中国材料工程大典

中国机械工程学会　中国材料研究学会

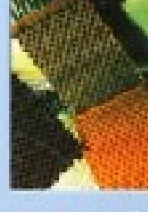


中国材料工程大典编委会















第21卷　材料塑性成形工程（下）

胡正寰　夏巨谌　主编



CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON

中国材料工程大典

中国机械工程学会 中国材料研究学会

中国材料工程大典编委会

第21卷 材料塑性成形工程（下）

胡正寰 夏巨谌 主编

化学工业出版社

·北 京·

（京）新登字039号

内容简介

中国材料工程大典是中国机械工程学会和中国材料研究学会共同组织全国39位院士、百余位各学科带头人、千余位材料工程专家共同执笔编写，全面反映当今国内外材料工程领域发展的最新资料和最新成果，集实用性、先进性和权威性于一体的大型综合性工具书。中国材料工程大典包括材料工程基础、钢铁材料工程、有色金属材料工程、高分子材料工程、无机非金属材料工程、复合材料工程、信息功能材料工程、粉末冶金材料工程、材料热处理工程、材料表面工程、材料铸造成形工程、材料塑性成形工程、材料焊接工程、材料特种加工成形工程、材料表征与检测技术等内容，涵盖了材料工程的各个领域，将最新的实用数据（特别是与国际接轨的标准数据）、图表与先进实用的科研成果系统地集合起来，并附应用实例，充分展示了材料工程各领域的现状和未来。中国材料工程大典不仅可以满足现代企业正确选材，合理用材，应用先进的材料成形加工技术，提高产品质量和性能，降低产品成本，增强产品市场竞争力的需要，而且对推动中国材料科学与材料成形加工技术的不断创新，促进制造业的发展，提高我国制造业的竞争能力，具有重要的现实意义。

本书为第21卷，材料塑性成形工程（下）。主要内容包括零件轧制成形、特种锻造成形、板管特种成形、型材挤压成形、塑料成形CAD/CAM、塑性成形质量控制与检测等。

本书主要供具有大专以上文化水平，从事材料工程研究的工程技术人员在综合研究和处理材料塑性成形工程的各类技术问题时使用，起备查、提示和启发的作用，也可供研究人员、理工院校的有关师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

中国材料工程大典．第21卷，材料塑性成形工程．下/胡正寰，夏巨谌主编．—北京：化学工业出版社，2005.8
ISBN 7-5025-7323-2

Ⅰ.中…　Ⅱ.①胡…②夏…　Ⅲ.①材料科学②金属材料—塑性变形　Ⅳ.①TB3②TG111.7

中国版本图书馆CIP数据核字（2005）第094421号

中国材料工程大典
第21卷
材料塑性成形工程（下）
中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会
胡正寰　夏巨谌　主编
责任编辑：周国庆　陈志良　李骏带
责任校对：陶燕华
封面设计：雷嘉琦
*
化学工业出版社出版发行
（北京市朝阳区惠新里3号　邮政编码：100029）
购书咨询：（010）64982530
（010）64918013
购书传真：（010）64982630
http://www.cip.com.cn
*
新华书店北京发行所经销
北京蓝海印刷有限公司印装
开本880mm×1230mm 1/16　印张50　字数2313千字
2006年1月第1版　2006年1月北京第1次印刷
ISBN 7-5025-7323-2
定价：150.00元

鸣　　谢

在编写过程中，得到以下部门和单位的支持和协作，使《中国材料工程大典》得以顺利编撰完成。在此，中国材料工程大典编委会代表全体作者表示衷心感谢！

支持部门：中华人民共和国科学技术部
国防科学技术工业委员会
国家自然科学基金委员会
中国科学技术协会
中国科学院
中国工程院

协作单位

钢铁研究总院
北京有色金属研究总院
北京航空材料研究院
中国建筑材料科学研究院
中国科学院金属研究所
中国科学院上海硅酸盐研究所
上海宝钢集团公司
中国石油化工集团公司
中国铝业公司
清华大学
中南大学
太原钢铁集团公司
西北有色金属研究院
宁夏东方有色金属集团公司
华中科技大学
中国第二重型机械集团公司
北京科技大学
北京航空航天大学
中国航天集团第703研究所
中国特种设备检测研究中心
哈尔滨工业大学
贵州安大航空锻造公司
东北大学
西安重型机械研究所
中国科学院半导体研究所
四川大学
北京航空制造工程研究所
中国科学院物理研究所
西北工业大学
北京矿冶研究总院
沈阳铸造研究所
江苏法尔胜公司

序

材料是当代社会经济发展的物质基础，也是制造业发展的基础和重要保障。进入21世纪以来，随着经济全球化的发展和中国的崛起，现代制造业的重心正不断向中国转移。据统计，今天中国制造业直接创造国民生产总值的1/3以上，约占全国工业生产的4/5，为国家财政提供1/3以上的收入，占出口总额的90%。但是与发达国家相比，我国制造业的水平不高、自主创新能力不足、高端市场竞争力还不强。我国虽然已是世界制造业大国，但还不是世界制造业强国。在有关因素中，材料工程基础薄弱是制约我国制造业发展的关键因素。广义的材料工程包括材料制备、测试和加工成形过程。为了提高我国制造业的水平和竞争力，突破材料工程这个薄弱环节，中国机械工程学会和中国材料研究学会牵头，会同中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会共同组织编撰《中国材料工程大典》（简称《材料大典》），其目的是力图为我国制造业提供一部集科学性、先进性和实用性于一体的综合性专业工具书。以满足广大科技工作者的迫切需求，为科技自主创新和我国制造业的崛起加强技术基础。

经过5年多的艰苦努力，《材料大典》终将出版了。这部共26卷约7000万字的巨著，是39位两院院士和1200余位参编专家教授们辛勤劳动的智慧结晶。有的作者为此牺牲了健康，如一位退休了的总工程师，为了把他多年的研究成果和实践经验写成书稿，由于长时间写作，导致眼睛视网膜脱落……。这种敬业精神与坚强毅力是值得我们学习铭记的。借此机会，我们要感谢中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会的支持。这些学会的众多专家教授积极参与了《材料大典》编写工作，与中国机械工程学会和中国材料研究学会的专家教授一起完成这项艰巨任务，从而使《材料大典》在完整性与先进性、科学性与实用性的结合上得到了加强；我们要感谢科学技术部、国防科学技术工业委员会、国家自然科学基金委员会、中国科学技术协会、中国科学院、中国工程院，以及各协作单位对编写工作的大力支持和积极帮助；我们也要感谢师昌绪院士等顾问的殷切指导，他们在编委会的两次工作会议上提出了许多重要的意见和建议，平时也给予了经常关心和指导，使我们少走了许多弯路；我们还要对关心和支持《材料大典》编写工作的科研院所、院校、企业以及有关人员表示感谢。没有大家的支持与协同，就不可能有《材料大典》的成功编写和顺利出版。

《材料大典》既总结了10多年来在材料工程方面的最新数据、图表及科研成果，还汇集了国内外在材料工程方面的成熟经验和先进理念，它体现了科学性、先进性和实用性的结合。可供具有大专以上文化水平的有关工程技术人员查阅使用，也可供理工院校的师生参考。

编撰《材料大典》涉及范围广，难度大，书中不可避免地会存在一些缺点和不足之处，恳请各位读者指正。

中国机械工程学会理事长
中国材料工程大典编委会主任

2005年9月23日

前　言

《材料塑性成形工程》是《中国材料工程大典》中的卷目之一。

材料塑性成形加工行业是制造行业的主要组成部分，对国民经济的发展有重要作用。材料的锻造与冲压，是汽车、飞机、造船、军工、钢铁、电力工程、农机、家电、装备制造业等支柱产业，也是当代材料工程和先进制造技术的重要内容。中国已成为世界锻件和冲压件生产的第一大国，2004年锻件与冲压件产量已达到2000多万吨。但同时也面临着对锻件与冲压件生产的技术水平、质量、能耗、环保等方面的严峻挑战。中国的锻造与冲压工业要向世界先进水平看齐，变“锻造大国”为“锻造强国”，这也是我国广大从事塑性成形技术与生产的工作者所面临的紧迫而艰巨的任务。《中国材料工程大典》中的《材料塑性成形工程》卷的编写和出版，正好适应了这种形势发展的需要。

《材料塑性成形工程》卷（上下册）是我国迄今为止覆盖面最宽、内容最新的材料塑性成形专业工具书。内容包括概论、锻造成形、板料冲压成形、板型管轧制成形、零件轧制成形、特种锻造成形、板管特种成形，型材挤压成形、塑性成形CAD/CAM和塑性成形质量控制与检测等10篇约400万字。参加这部著作编写的胡正寰和夏巨谌统稿合成。参加的主要单位有北京科技大学、华中科技大学、长春一汽锻造有限公司、东风汽车公司锻造厂、湖北汽车集团公司、哈尔滨工业大学、吉林大学、西北工业大学、武汉理工大学、太原重机学院、南昌大学、南昌航空工业学院等。历时3年多完成编写工作。

各篇的主编如下：

第1篇	概论	夏巨谌	张　金		
第2篇	锻造成形	夏巨谌	郭会光		
第3篇	板料冲压成形	杨　合	华　林	刘郁丽	
第4篇	板型管轧制成形	张　杰	杨海波	施东成	陈南宁
第5篇	零件轧制成形	胡正寰	华　林		
第6篇	特种锻造	王高潮			
第7篇	板管特种成形	李明哲	蔡中义		
第8篇	型材挤压成形	夏巨谌	闫　洪		
第9篇	塑性成形CAD/CAM	李志刚			
第10篇	塑性成形质量控制与检测	吕　炎			

本书在整体设计上是“立足全局，反映共性，突出重点，实用便查”。在具体编写上是以材料的塑性成形工艺为主，以工模具设计及关键设备的应用为辅；以目前生产中普遍使用的锻造与冲压工艺及主要的模具设计方法为基础，向塑性成形新工艺新模具及新设备延伸。本书全面系统地反映了我国塑性成形技术的发展及取得的成就和经验，介绍了国内外的先进塑性成形技术，具有“科学性，先进性和实用性。”本书主要供从事制造业和材料工程的科学技术人员使用，也可以供研究人员，管理人员和高等院校师生参考。

感谢中国机械工程学会、中国材料研究学会和中国材料工程大典编委会对《材料塑性成形工程》卷编写工作的指导与大力支持。由于编写时间紧迫和编者水平所限，书中难免有疏漏与不当之处，敬请读者指正并提出宝贵意见。

胡正寰　夏巨谌

2005年9月9日

目　录

中 国 材 料 工 程 大 典
CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON
第 21 卷 材料塑性成形工程（下）

第 5 篇

零件轧制成形

主 编 胡正寰 华 林
编 写 黄良驹 胡正寰 张 巍
刘晋平 华 林 程培元
胡亚民 赵云豪
审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会

零件轧制成形是指用轧制方法成形机器零件的工艺与技术。

零件轧制与传统的冶金轧制都属轧制范畴，但轧制的产品不同。冶金轧制主要生产等截面的产品，例如用量很大的板材、型材与管材；零件轧制主要生产变截面的产品，例如汽车半轴、轴承钢球，即机器零件与金属制品等。所以，零件轧制是冶金轧制的发展、延伸与深度加工，故又称为特种轧制。

零件轧制与传统的锻造都属零件塑性成形范畴，但成形方式不同。锻造为整体，断续成形；零件轧制为局部、连续成形。

零件轧制在国际上又称为回转成形，因为工件是在回转中成形零件的。回转可以是工件，也可以是工具，还可以是工具加工件。由于工件在回转中成形，所以成形是局部、连续的。

零件轧制与锻造成形零件比较有如下优点：

1）工作载荷小。由于是局部成形，工作载荷只有模锻的几十分之一，结果是设备重量与投资都大幅度下降，而模具寿命近10倍增加。

2）生产效率高。由于是连续成形，生产效率一般提高几倍到10多倍。

3）产品质量好。成形产品尺寸精度高，具有显著的节材效果；成形零件的金属纤维流线好，产品性能好。

4）工作环境好。没有锻造的冲击、噪声，进出料容易实现自动化。

零件轧制与锻造比较的缺点是：通用性差，设备与模具是专用的，并且多数模具的设计、制造及工艺调整都比较复杂，所以零件轧制适合生产批量大的零件，例如汽车、拖拉机、摩托车、自行车等上的零件。

不同的回转成形工艺，其生产的产品形状各异，但综合起来产品类型比较齐全。下面将各种回转成形工艺的产品类型加以说明。

辊锻：生产轴向变截面件，可以是长杆类，也可以是板片类零件。典型产品有犁铧、锄头、钢叉、十字镐及叶片等；为模锻制坯的有汽车曲轴和前轴，五金工具等。

横轧：生产圆柱直齿轮、斜齿轮、锥齿轮、链轮及各种螺纹件等零件。

楔横轧：生产各种台阶轴零件。典型产品有汽车及拖拉机变速箱中的各种轴、油泵齿轮轴、发动机凸轮轴等，为模锻制坯的发动机连杆、五金工具等。

斜轧：生产各种回转体零件。典型产品有轴承钢球及滚子、球磨钢球、自行车钢球及丝杠等，为模锻制坯的球头吊环、柴油机摇臂等。

辗环：生产各种环类零件。典型产品有火车车轮及轮箍、轴承内外环、喷气发动机上的环形件等。

摆辗：生产各种盘类零件。典型产品有汽车拖拉机上的齿轮坯、铣刀片、盘形弹簧片、扬声器导磁体、汽车半轴等。

旋压：生产各种筒形零件。典型产品有灯罩、压力锅体、气瓶、导弹壳体及封头等。

径向锻造：生产各种实心与空心台阶轴零件。典型产品有缝纫机针、汽车转向直接杆、车床主轴等。



第1章 辊 锻

1 概述

辊锻变形原理如图5.1-1所示。坯料被辊锻模咬入后，高度方向受到压缩，少部分金属宽展，大部分金属沿长度方向流动。故辊锻工艺适用于减小坯料截面的锻造过程，如杆件的拔长、板坯的辗片以及沿杆件轴向分配金属体积的变形过程。辊锻工艺的分类与应用见表5.1-1。

辊锻工艺特点：

1）生产效率高。一个辊锻周期通常只需十几秒甚至几秒，适合大批量生产要求。

2）省力。由于辊锻是连续局部成形过程，模具与坯料接触面积小，因此所需的变形力较小，与整体模锻相比，可减小设备吨位70%～90%。

3）劳动环境好。由于辊锻是静压变形过程，冲击、振动、噪声小，符合环境保护要求。

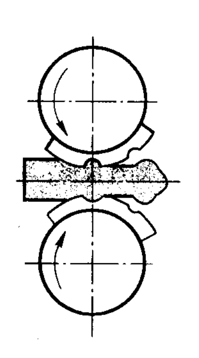


图5.1-1 辊锻变形原理

4）易于与其他模锻设备组成机械化、自动化的生产线。

5）受变形特点的限制，对于复杂锻件，可能产生局部充填不良、尺寸精度较低的现象。

表5.1-1 辊锻工艺的分类与应用

分类方法	类　别	变形特点	应　用
按用途分类	制坯辊锻	沿坯料长度方向分配金属体积	为锻压机或其他设备模锻提供毛坯，效率高，节省材料
	成形辊锻	直接成形锻件或锻件的某一部分	适合辊锻长轴类、板片类等锻件，效率高，节省材料与能源
按型槽形式分类	开式型槽辊锻	上下型槽间有水平缝隙，宽展较自由	常用于制坯辊锻
	闭式型槽辊锻	宽展受限制，可强化延伸、限制锻件水平弯曲	既可用于制坯辊锻，也可用于成形辊锻
按辊锻温度分类	热辊锻	加热至再结晶温度以上	用得最多
	冷辊锻	通常在常温条件下	多用于锻件精整或有色金属
按送进方式分类	顺向辊锻	毛坯送进方向与辊锻方向一致	不需夹钳料头，常用于成形辊锻
	逆向辊锻	毛坯送进方向与辊锻方向相反	操作方便，常用于制坯辊锻

2 辊锻变形的基本原理

2.1 辊锻变形区及其几何参数

毛坯上与辊锻模接触部分产生明显塑性变形的区域称为变形区（图5.1-2）。变形区中主要几何参数有：绝对变形量、相对变形量、变形系数等，用这些参数表示辊锻时的变形程度。绝对变形量为：绝对压下量Δh、绝对宽展量Δb、绝对延伸量Δl。它们分别表示如下：

$$\begin{aligned}\Delta h &= h_0 - h_1\\ \Delta b &= b_1 - b_0\\ \Delta l &= l_1 - l_0\end{aligned} \qquad (5.1\text{-}1)$$

式中，h_0、b_0、l_0为变形前毛坯的高度、宽度和长度；h_1、b_1、l_1为变形后锻件的高度、宽度和长度。

绝对变形量与毛坯相应原始尺寸的比值称为相对变形量，通常用百分数表示如下

$$\begin{aligned}&\text{相对压下量}\ \frac{\Delta h}{h_0}\times 100\% = \frac{h_0 - h_1}{h_0}\times 100\%\\ &\text{相对宽展量}\ \frac{\Delta b}{b_0}\times 100\% = \frac{b_1 - b_0}{b_0}\times 100\%\\ &\text{相对延伸量}\ \frac{\Delta l}{l_0}\times 100\% = \frac{l_1 - l_0}{l_0}\times 100\%\end{aligned} \qquad (5.1\text{-}2)$$

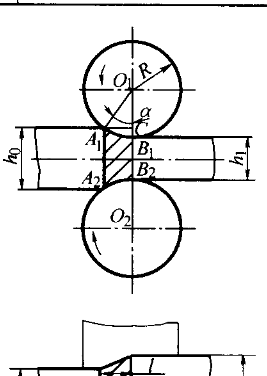


图5.1-2 辊锻变形区

变形后锻件尺寸与毛坯相应原始尺寸的比值称为变形系数，分别表示如下：

$$\begin{aligned}&\text{压下系数}\ \eta = h_1/h_0\\ &\text{宽展系数}\ \beta = b_1/b_0\\ &\text{延伸系数}\ \lambda = l_1/l_0\\ &\text{断面减小系数}\ \varphi = F_1/F_0\end{aligned} \qquad (5.1\text{-}3)$$

咬入角：变形区所对应的锻辊圆心角 α 称为咬入角。

咬入弧：毛坯与锻辊接触的弧 $\widehat{A_1B_1}$ 称为咬入弧。

咬入弧的弦长：咬入弧所对应的弦长 A_1B_1 称为咬入弧的弦长。

变形区长度：咬入弧的水平投影 l 称为变形区长度。根据图 5.1-2 中的几何关系可得：

$$l=\overline{A_1C}=\sqrt{R^2-(R-\frac{\Delta h}{2})^2}=\sqrt{R\Delta h-\frac{1}{4}\Delta h^2} \tag{5.1-4}$$

式中，R 为锻辊半径；Δh 为绝对压下量。

当咬入角 $\alpha<20°$时，$\frac{\Delta h^2}{4}$ 与 $R\Delta h$ 相比，其值很小，可忽略不计，则

$$l=\sqrt{R\Delta h} \tag{5.1-5}$$

咬入角 α 可用下式表示

$$\cos\alpha=l-\frac{\Delta h}{D} \tag{5.1-6}$$

式中，D 为锻辊直径。

当咬入角不大时，可近似地认为咬入弧与变形区长度相等，于是 α（弧度）可由下式近似确定：

$$\alpha\approx\frac{\sqrt{R\Delta h}}{R}=\sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \tag{5.1-7}$$

2.2　咬入条件

辊锻时，辊锻模咬入毛坯有两种形式：毛坯端部自然咬入和毛坯中部强制咬入。

(1) 端部自然咬入

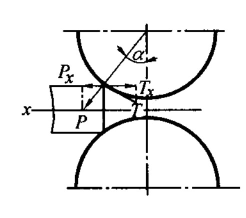
1) 实现开始咬入的条件。图 5.1-3a 所示为自然咬入时的开始咬入阶段。当毛坯靠紧模具时，受到模具径向力 P 和摩擦力 T 的作用。实现咬入的条件是：摩擦力在水平方向上的分力应大于径向力的分力，即：

$$T\cos\alpha>P\sin\alpha$$

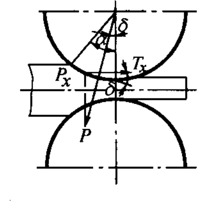
因为　　$T=\mu P$ 及 $\mu=\tan\beta$

所以，实现开始咬入的条件变为：$\alpha<\beta$，即咬入角必须小于摩擦角。

以上式中，α 为咬入角；β 为咬入时的摩擦角，又称为极限咬入角；μ 为咬入时毛坯与模具间的摩擦因数。



(a) 开始咬入



(b) 已经咬入

图 5.1-3　毛坯咬入受力分析

2) 实现稳定咬入的条件。毛坯被模具咬入后，合力的作用点向两锻辊中心连线方向移动，如图 5.1-3b 所示。由于此时 $\delta<\alpha$，所以只要能满足端部自然咬入条件，就能实现稳定咬入。

当采用中间咬入或强制送进时，有可能增大咬入角，但要受到辊锻过程打滑条件的限制，即极限咬入角 $\alpha_{max}\leqslant2\beta$。

通常取　　$\alpha_{max}=(1.3\sim1.5)\beta$

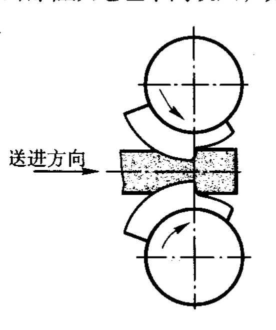
表 5.1-2 给出了生产实践中得到的各种不同情况下的极限咬入角。

(2) 中间咬入

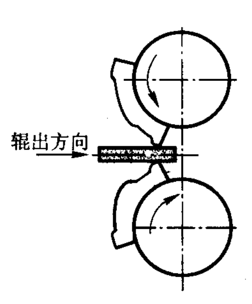
表 5.1-2　极限咬入角

辊锻条件	极限咬入角 α/(°)
冷辊钢和其他金属时：	
在有润滑剂的光滑模具上	3～4
在无润滑剂的粗糙模具上	5～8
热辊时：	
钢板	18～22
铝（在 350℃时）	20～22
镍（在 1 100℃时）和白铜（在 950℃时）	22
黄铜 H62 和 H68（在 800℃时）	21～24
型钢	22～24
铜（在 900℃时）	27
型钢在表面有刻痕的模具上	27～34

辊锻模具通常为型腔截面变化的扇形模具，常由模具突出部位从毛坯中间咬入，如图 5.1-4 所示。



(a) 型槽中部实现中间咬入



(b) 辊锻模前壁实现中间咬入

图 5.1-4　中间咬入形式

由于中间咬入相当于机械式钳入，并不受摩擦条件的影响，其咬入角可以很大，可达 32°～37°，咬入条件大为改善。但咬入后要继续进行辊锻，仍须受到摩擦条件的限制，以防打滑现象发生。

2.3　辊锻时金属的延伸

毛坯在辊锻模的压缩作用下，少量金属宽展，大部分金属沿长度方向流动，即延伸。

延伸变形大小通常用延伸系数表示，即：

$$\lambda=\frac{l_1}{l_0}=\frac{F_0}{F_1}$$

式中，l_0、l_1 为变形前后毛坯的长度；F_0、F_1 为变形前后毛坯的横截面积。

当锻件进行多道次辊锻时，每次变形后的横截面积与相应的延伸系数存在如下关系：

$$F_0=F_1\lambda_1$$

$$F_1=F_2\lambda_2$$

$$\cdots\cdots$$

$$F_{(n-1)}=F_n\lambda_n$$

由上式可得

$$\lambda_z=\frac{F_0}{F_n}=\lambda_1\lambda_2\cdots\lambda_n=\lambda_p^n \tag{5.1-8}$$

式中，λ_z 为总延伸系数；λ_p 为各道次平均延伸系数；n 为辊锻道次。

延伸变形的影响因素：

1) 压下量。这是影响延伸变形的最重要因素，随着压下量增大，延伸系数明显增大（图 5.1-5）。

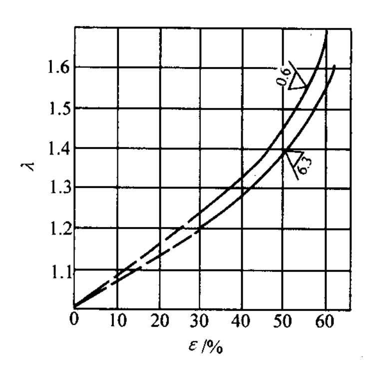


图 5.1-5 延伸系数与相对压下量及型槽表面粗糙度的关系

2）锻辊直径。通常以 $q=\dfrac{D}{\sqrt{F_0}}$ 之值的变化来表征锻辊直径对延伸系数的影响。随着 q 值增加，延伸系数减小（图 5.1-6）。这是因为，当压下量相同时，随着锻辊直径增加，将使变形区长度增加，使金属的纵向流动阻力增大，因而延伸变形减小。

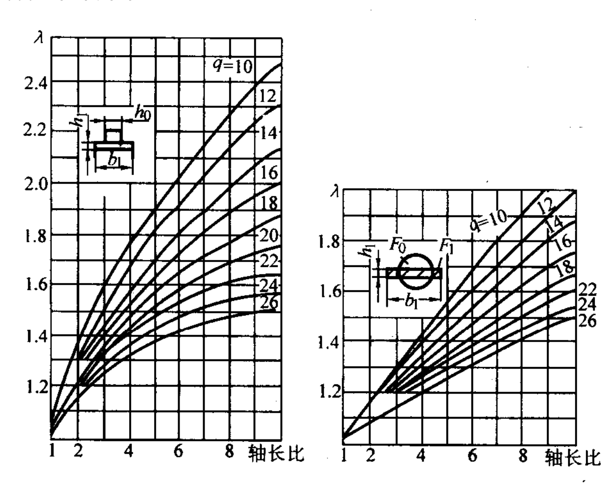


图 5.1-6 q 值对延伸系数的影响

3）模具及毛坯截面形状。模具及毛坯截面形状不同，其接触状态及摩擦情况也不同，从而影响延伸变形。如图 5.1-7 所示，平型槽辊锻方形毛坯和圆形毛坯时，方形毛坯与型槽接触面间摩擦阻力可阻碍宽展，因而比辊锻圆形毛坯延伸变形更大。模具型槽形状的影响同理。

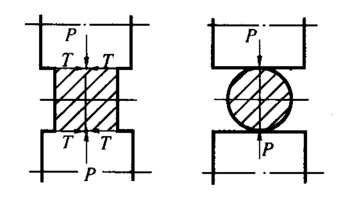


图 5.1-7 毛坯形状对延伸的影响

4）接触摩擦条件。实践表明，减小接触摩擦因数，可增大延伸变形。因此，降低型槽表面粗糙度数值及辊锻时使用润滑剂，将有利于延伸变形（图 5.1-5）。

5）变形温度。随着变形温度升高，材料塑性变好，延伸系数将增大。

2.4 辊锻时金属的纵向流动及前滑与后滑

（1）前滑与后滑

辊锻时变形区内金属流动方向如图 5.1-8 所示。在纵向有一个分流面，其流动速度与锻辊线速度的水平分速度相等，此面称为中性面。它与两辊中心联线的夹角 γ 称为中性角。在中性面的前面区域称为前滑区，在该区内，金属流动速度大于锻辊线速度的水平分速度，即金属相对于锻辊向前流动——前滑。在中性面的后面区域称为后滑区，在该区内，金属流动速度小于锻辊线速度的水平分速度，即金属相对于锻辊向后流动——后滑。由于前滑，造成锻件长度大于模具相对应的弧长，所以应予以关注，必须进行计算。

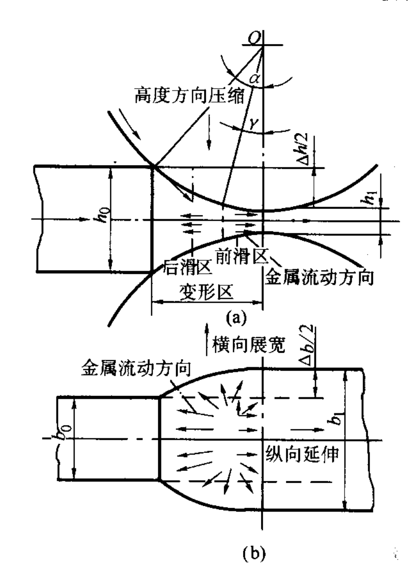


图 5.1-8 辊锻变形区内金属流动方向

前滑值 S 通常用下式表示：

$$S=\frac{v_j-v_m}{v_m}\times100\%=\frac{L_j-L_m}{L_m}\times100\% \qquad (5.1\text{-}9)$$

式中，v_j 为锻件在出口处的速度；v_m 为锻模圆周线速度；L_j 为锻件长度；L_m 为模具相对应的弧长。

（2）前滑值的计算

前滑值与辊锻过程中的多种因素有关。目前尚无能包括所有因素的准确计算公式。因此，用公式计算出的前滑值，往往需经试验进行修正。下面介绍简单变形时的前滑值计算公式（芬克公式）：

$$S=\left(\frac{R}{h_1}-\frac{1}{2}\right)\gamma^2$$

由于 $\gamma^2/2$ 数值很小，可忽略不计，则芬克公式可简化为：

$$S=\frac{R}{h_1}\gamma^2 \qquad (5.1\text{-}10)$$

式中，R 为锻辊半径；h_1 为毛坯出口端的高度；γ 为中性角。可按下式计算：

$$\gamma=\frac{\alpha}{2}\left(1-\frac{\alpha}{2\beta}\right) \qquad (5.1\text{-}11)$$

式中，α 为咬入角；β 为摩擦角。

对于成形辊锻，由于模具型槽纵向及横向截面通常是变化的，金属流动要受到模壁的约束，因此，准确计算其前滑值较困难，可根据经验选取，然后在调整试验中加以修正。表 5.1-3 为一些辊锻件的实测前滑值。

表 5.1-3 辊锻件实测前滑值

辊锻类型	前滑值 S/%
叶片成形辊锻： 预成形道次	3～5



续表 5.1-3

辊锻类型	前滑值 S/%
终成形道次	2～3
连杆成形辊锻：	
终成形道次（按连杆大小头的中心距计算）	3～4
前轴成形辊锻	1.8～3.5
变截面板簧成形辊锻	3～6
制坯辊锻	4～6

(3) 影响前滑的因素

1) 相对压下量。相对压下量越大，延伸量也越大，其前后滑的金属也越多。因此，随着相对压下量的增加，金属的前滑值是增加的。图 5.1-9 表示在辊径为 400 mm、温度 1 000℃时，前滑与相对压下量的关系。

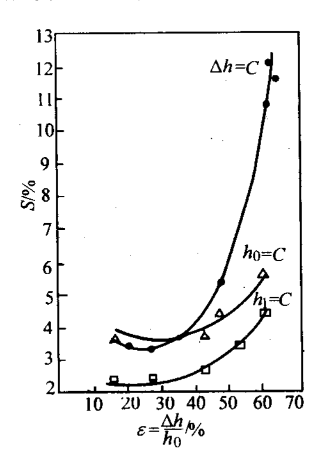


图 5.1-9 前滑与相对压下量的关系

2) 锻辊直径。由芬克公式可见，随着锻辊直径增加，前滑值是增加的。但 $D<400$ mm 时，前滑值增加较快，$D>400$ mm 以后，前滑值增加则较慢了，如图 5.1-10 所示。

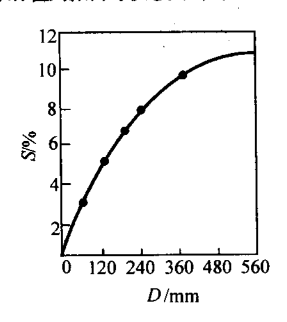


图 5.1-10 前滑与辊径的关系

3) 毛坯宽度。当毛坯宽度较小时，增加宽度使宽展减小，延伸增加，故前滑增大。但当毛坯宽度增加到宽度和长度方向上的金属体积比值不再有变化时，前滑不再受它的影响。

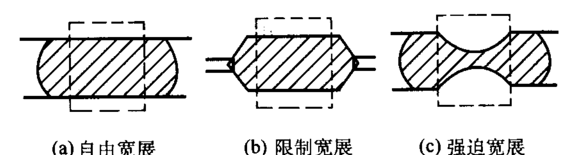
4) 摩擦因数。由芬克公式可见，随着摩擦因数增大，中性角增大，前滑值也增大。凡是使摩擦因数增大的因素，如锻辊和毛坯的表面状态、润滑、变形温度和速度等，均可使前滑增加。

5) 模具及毛坯截面形状。凡是有利于延伸的模具及毛坯截面形状，均可使前滑增加。如方形毛坯采用椭圆型槽辊锻，比采用长方形型槽辊锻，更有利于延伸，所以前滑更大。

2.5 辊锻过程中的宽展

(1) 宽展的形式

辊锻过程中，根据模具对变形金属横向流动约束作用的不同，宽展可分为自由宽展、限制宽展和强迫宽展三种形式，如图 5.1-11 所示。



(a) 自由宽展　(b) 限制宽展　(c) 强迫宽展

图 5.1-11 各种宽展形式

1) 自由宽展。金属横向流动只受摩擦阻力的影响，没有模具型槽的限制。在平辊上轧制或在宽度较大的扁平型槽内辊锻时均为自由宽展。

2) 限制宽展。毛坯在凹形型槽内辊锻时，型槽侧壁限制金属横向自由流动，故称限制宽展。型槽形式不同，对宽展的限制作用程度也不同，在闭式型槽内，宽展很小。

3) 强迫宽展。毛坯在凸形型槽内辊锻时，金属在凸形部分作用下，剧烈向横向流动，称为强迫宽展。显然强迫宽展量大于自由宽展量。

在辊锻变形中，限制宽展、强迫宽展或二者并存是主要的宽展形式。

(2) 影响宽展的因素

影响宽展的因素可分为几何的和物理的两大类。几何因素主要有：压下量、锻辊直径、变形区长度及变形区入口和出口的高度、宽度等。物理因素主要有：摩擦因数、辊锻温度、材料化学成分、锻辊线速度和应变速率等。现就主要因素对宽展的影响分述如下：

1) 压下量。压下量越大，金属向纵向及横向流动得越多，因而宽展也越大。这是最主要的影响因素，所以常常用宽展指数$\frac{\Delta b}{\Delta h}$来表征宽展的大小。

2) 锻辊直径。锻辊直径增大，变形区长度增加，纵向延伸的阻力随之增加，因而有利于金属横向流动，即宽展增大。

3) 毛坯宽度。随着毛坯宽度增大，横向摩擦阻力也增大，因而宽展减小。当宽厚比足够大时，如宽板轧制，宽度几乎不再增加，此时可视为平面变形。

4) 摩擦因数。随着摩擦因数增加，延伸减小，宽展增大。因此，凡是影响摩擦的因素如模具材料及表面粗糙度、辊锻温度、辊锻速度、润滑状况等，都对宽展产生影响。

5) 辊锻道次。同一毛坯，辊锻道次越多，宽展越小。这是因为辊锻道次较多时，每次压下量较小，变形区的宽长比 B/l 较大，有利于延伸，宽展就小。

(3) 宽展的计算

由于影响宽展的因素很多，目前尚无包含所有影响因素的精确计算公式。通常先按简单变形条件，即在平辊上辊锻矩形毛坯来计算宽展量。对于复杂型槽辊锻的宽展，可根据不同情况加以修正。

1) 简单变形条件下宽展的计算。计算公式很多，各种公式由于考虑的因素和应用情况不同，其计算结果和精确程度也不尽相同。现选几种较实用的计算公式阐述如下。

① 用量纲分析法确定的宽展计算公式

当$\frac{b_0}{h_0}<1$时，

$$\frac{\Delta b}{\Delta h}=\frac{b_0}{h_0}\left(1+\frac{\Delta h}{h_0}\right)\left(\mu\sqrt{\frac{\Delta h}{h_0}\frac{D}{h_0}}-\frac{1}{2}\frac{\Delta h}{h_0}\right) \tag{5.1-12}$$

$$\text{当}\frac{b_0}{h_0}\geqslant 1\text{时}，\frac{\Delta b}{\Delta h}=\left(1+\frac{\Delta h}{h_0}\right)\left(\mu\sqrt{\frac{\Delta h}{h_0}\frac{D}{h_0}}-\frac{1}{2}\frac{\Delta h}{h_0}\right) \tag{5.1-13}$$

② А.И.Целиков 公式

$$\frac{\Delta b}{\Delta h}=C\left(2\sqrt{\frac{R}{\Delta h}}-\frac{1}{\mu}\right)\phi(\varepsilon) \tag{5.1-14}$$

式中，C 为由毛坯原始宽度 b_0 和变形区长度 $l=\sqrt{R\Delta h}$ 的比值决定的系数：

$$C=1.34\left(\frac{b_0}{\sqrt{R\Delta h}}-0.15\right)e^{0.15-\frac{b_0}{\sqrt{R\Delta h}}}+0.5$$

$\phi(\varepsilon)$为由相对压下量 ε 决定的函数：

$$\phi(\varepsilon)=0.138\varepsilon^2-0.328\varepsilon$$

А.И.Целиков 公式基本上正确地反映了各种因素对宽展的影响，可在实际计算中应用。

③ S.Ekelund 公式。变形后的宽度 b_1 可按下式计算：

$$b_1=\sqrt{4m^2(h_0+h_1)^2\left(\frac{l}{b_0}\right)^2+b_0{}^2+4ml(3h_0-h_1)}-2m(h_0+h_1)\frac{l}{b_0} \tag{5.1-15}$$

式中，m 为系数，$m=\dfrac{1.6\mu l-1.2\Delta h}{h_0+h_1}$。

该公式较精确地反映了各种因素对宽展的影响，实用的压下量范围较大，计算结果比较精确。

④ В.П.Вахтинов 公式

$$\Delta b=1.15\frac{\Delta h}{2h_0}\left(\sqrt{R\Delta h}-\frac{\Delta h}{2\mu}\right) \tag{5.1-16}$$

该公式是根据金属位移体积与其所消耗功成正比的关系从理论上推导出的，在$\dfrac{b_0}{2\sqrt{R\Delta h}}>1$时，计算结果较正确。

⑤ E.Sibe 公式

$$\Delta b=c\frac{\Delta h}{h_0}\sqrt{R\Delta h} \tag{5.1-17}$$

式中，c 为考虑到变形温度的影响系数，其值为 $c=0.35\sim0.45$。

该公式是 E.Sibe 在研究接触表面摩擦力的基础上，确定宽展量与相对压下量及变形区长度成正比的关系式。由于没有考虑毛坯宽度的影响，因此当毛坯宽度小于或等于其厚度时不能采用。

⑥ С.И.Губкин 公式

$$\Delta b=\left(1+\frac{\Delta h}{h_0}\right)\left(\mu\sqrt{R\Delta h}-\frac{\Delta h}{2}\right)\frac{\Delta h}{h_0} \tag{5.1-18}$$

该公式是以实验为基础而得出的，考虑了影响宽展的主要因素，可在实际中应用。

⑦ Z.Wusatowski 公式

$$\beta=\eta^{-10^{-1.269\delta\varepsilon_d^{0.556}}} \tag{5.1-19}$$

式中，β 为宽展系数，$\beta=b_1/b_0$；η 为压下系数，$\eta=h_1/h_0$；δ 为毛坯原始宽度与高度之比，$\delta=b_0/h_0$；ε_d 为毛坯原始高度与锻模公称直径之比，$\varepsilon_d=h_0/D$。

当采用大压下量辊锻时（$\Delta h/h_0=0.5\sim0.9$），其宽展系数 β 按下式计算：

$$\beta=\eta^{-10^{-3.457\delta\varepsilon_d^{0.968}}} \tag{5.1-20}$$

该式是在大量实验基础上得出的。公式作者认为影响宽展的重要因素是毛坯的断面尺寸和锻模公称直径。

2）复杂变形条件下宽展的计算

① 修正计算法。通常辊锻型槽均为非矩形的，形状较复杂，可先简化为面积及轴长比相等的矩形计算其宽展指数，然后乘上一个修正系数，即

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}=K_b\frac{\Delta b}{\Delta h} \tag{5.1-21}$$

式中，$\dfrac{\Delta b_c}{\Delta h_c}$为在型槽内辊锻的宽展指数；$\dfrac{\Delta b}{\Delta h}$为在平辊上辊锻矩形毛坯的宽展指数；$K_b$ 为修正系数，它取决于型槽的形式、型槽的轴长比以及金属在型槽宽度方向的充满程度。常用型槽宽展修正系数的经验公式见表 5.1-4。当型槽充满程度 $1>\delta>0.7$ 及轴长比 a_0、a_1 为 1.5～4 的范围内，这些经验公式能取得较准确的结果。

② 经验法。由于实际情况的复杂性，按一般公式计算会出现较大的误差。故在实际应用中，常根据不同型槽由经验确定宽展指数 $\Delta b/\Delta h$，见表 5.1-5。

表 5.1-4　宽展修正系数

型槽及毛坯的形状	K_b 经验公式	公式中符号的意义
在椭圆型槽中辊锻方形毛坯	$K_b=1-0.8\delta(\delta-0.1a_1)$	$\delta=\dfrac{b_d}{b_k}$——型槽宽度方向的充满程度 b_k——型槽理论宽度 b_d——在该型槽辊出后的毛坯宽度 $a_0=\dfrac{b_0}{h_0}$——辊锻前毛坯的轴长比 $a_1=\dfrac{b_1}{h_1}$——辊锻后毛坯的轴长比 ϕ——箱形型槽侧壁斜角
在六角型槽中辊锻方形毛坯	$K_b=1-0.7\delta(\delta-0.1a_1)$	
在菱形型槽中辊锻方形毛坯	$K_b=1-0.5\delta(\delta-0.1a_1)$	
在椭圆型槽中辊锻圆形毛坯	$K_b=1-0.6\delta(\delta-0.1a_1)$	
在方形型槽中辊锻菱形毛坯	$K_b=1-0.3(1-0.1a_0)$	
在方形型槽中辊锻六角形毛坯	$K_b=1-0.5(1-0.1a_0)$	
在箱形型槽中辊锻矩形毛坯 $\tan\phi=0.05\sim0.15$ 时 $\tan\phi=0.15\sim0.30$ 时	 $K_b=0.6\sim0.7$ $K_b=0.7\sim0.8$	
在圆形型槽中辊锻椭圆形毛坯	$K_b=1.0$	
在平椭圆型槽中辊锻圆形毛坯	$K_b=1.0$	
在菱形型槽中辊锻菱形毛坯	$K_b=1.0$	



表 5.1-5 不同型槽的宽展指数

毛坯及型槽的形状	毛坯尺寸/mm	宽展指数 $\Delta b/\Delta h$
扁平箱形	—	0.25～0.5
圆坯进椭圆型槽	—	0.4～1.2
椭圆坯进方型槽	—	0.4～0.6
椭圆坯进圆型槽	—	0.2～0.4
菱形坯进方型槽	—	0.2～0.35
方坯进菱形型槽	—	0.25～0.4
方坯进六角形型槽	方坯边长 > 40	0.5～0.7
	方坯边长 < 40	0.65～1.0
方坯进椭圆型槽	方坯边长 6～9	1.4～1.2
	方坯边长 9～14	1.2～1.6
	方坯边长 14～20	0.9～1.3
	方坯边长 20～30	0.7～1.1
	方坯边长 30～40	0.5～0.9

2.6 辊锻力及辊锻力矩

辊锻时，变形金属作用在锻模上的力有两个：沿半径方向的径向力和切线方向的摩擦力。它们的合力即称为辊锻力，如图 5.1-12 所示。由于它的方向与铅垂线夹角很小，所以可认为辊锻力方向是垂直的。辊锻力和辊锻力矩是设计和选用辊锻机的重要依据，必须进行计算。

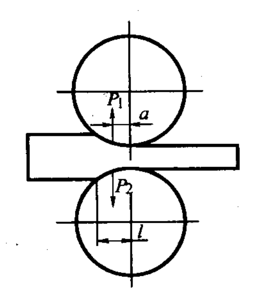


图 5.1-12 辊锻力与力矩

(1) 辊锻力的计算

辊锻力等于变形区金属与模具接触面上的平均单位压力乘以变形区的水平投影面积，即：

$$P = pF \tag{5.1-22}$$

辊锻时，变形各瞬间往往单位压力和变形区面积是变化的。计算辊锻力时，要选择压下量最大且接触面也最大的变形区，即最大辊锻力所处的变形区。

1) 变形区水平投影面积的确定。简单变形条件下，变形区的水平投影面积为：

$$F = \bar{b}l = \frac{b_0 + b_1}{2}\sqrt{R\Delta h} \tag{5.1-23}$$

复杂变形条件下，也可按上式进行近似计算，此时，应取型槽半径的平均值和压下量的平均值代替上式中的 R 和 Δh。不同毛坯在各种型槽中辊锻（图 5.1-13）的平均压下量可按表 5.1-6 公式进行计算。

2) 平均单位压力的确定。由于辊锻时金属与模具接触面上的单位压力分布是不均匀的，精确计算很困难。下面介绍几种较实用的计算公式。

① А.И.Целиков 公式

$$p = K\frac{2(1-\varepsilon)}{\varepsilon(\delta-1)}\left(\frac{h_r}{h_1}\right)\left[\left(\frac{h_r}{h_1}\right)^{\delta} - 1\right]$$

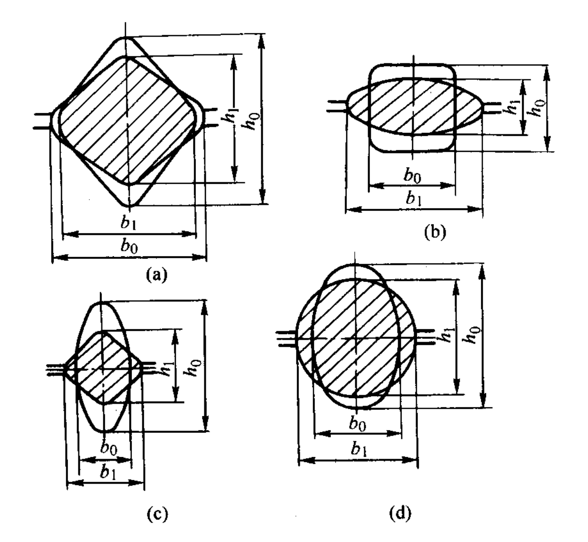


图 5.1-13 在各种型槽中辊锻不同毛坯

表 5.1-6 各种型槽的平均压下量

毛坯及型槽的形状	平均压下量
菱形毛坯进理想菱形型槽	$\Delta\bar{h} = (0.55\sim0.6)(h_0 - h_1)$
方形毛坯进椭圆型槽	$\Delta\bar{h} = h_0 - 0.7h_1$ $\Delta\bar{h} = h_0 - 0.85h_1$
椭圆毛坯进方形型槽	$\Delta\bar{h} = (0.65\sim0.7)h_0 - (0.55\sim0.6)h_1$
椭圆毛坯进圆形型槽	$\Delta\bar{h} = 0.85h_0 - 0.79h_1$

取 $$n_\sigma = \frac{2(1-\varepsilon)}{\varepsilon(\delta-1)}\left(\frac{h_r}{h_1}\right)\left[\left(\frac{h_r}{h_1}\right)^{\delta} - 1\right] \tag{5.1-24}$$

则 $$p = n_\sigma K = 1.155 n_\sigma \sigma_s \tag{5.1-25}$$

式中，K 为平面变形状态下材料的变形抗力，$K = 1.155\sigma_s$；

$$\delta = \mu\frac{2l}{\Delta h} = \mu\sqrt{\frac{2D}{\Delta h}};\quad \frac{h_r}{h_1} = \left[\frac{1+\sqrt{1+(\delta^2-1)\left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right)^{\delta}}}{(\delta+1)}\right]^{1/\delta};$$

h_r 为变形区中性面处毛坯高度。

为了简化计算，将式（5.1-24）绘成图 5.1-14 所示的曲线。根据相对压下量 ε 和 δ 值，即可从曲线上查得 n_σ 值。

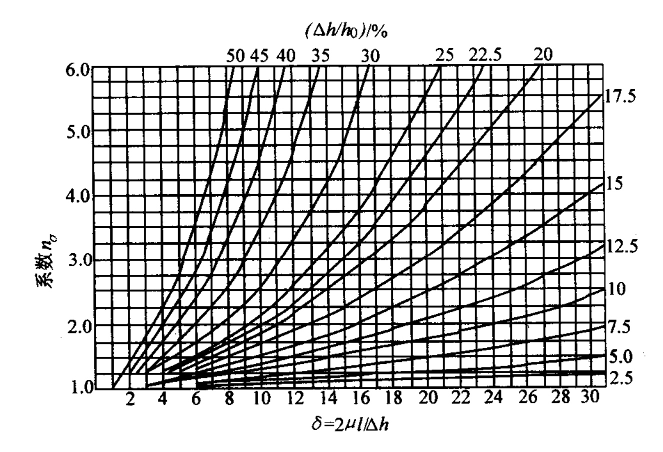


图 5.1-14 n_σ 与摩擦、尺寸等因素的关系曲线

А.И.Целиков 公式可用于热轧，也可用于冷轧薄件，在轧制中应用较多。

② S.Ekelund 公式



$$p=(1+m)(K+\eta\bar{\dot{\varepsilon}}) \qquad (5.1\text{-}26)$$

式中，m 为外摩擦影响系数：

$$m=\frac{1.6\mu\sqrt{R\Delta h}-1.2\Delta h}{h_0+h_1};$$

η 为黏性系数；$\bar{\dot{\varepsilon}}$ 为平均应变速率（s^{-1}）：

$$\bar{\dot{\varepsilon}}=\frac{2V\sqrt{\Delta h/R}}{h_0+h_1}$$

S.Ekelund 还给出了计算 K（MPa）和 η（$N\cdot s/mm^2$）的经验公式：

$$K=(140-0.1t)(1.4+C+Mn+0.3Cr) \qquad (5.1\text{-}27)$$

$$\eta=0.1(14-0.01t) \qquad (5.1\text{-}28)$$

式中，t 为辊锻温度，℃；C、Mn、Cr 为以%表示的元素碳、锰、铬的质量分数。

该公式是用于热轧时计算平均单位压力的半经验公式。

③ 斋藤公式

$$p=m\sigma'_s\left(0.75+0.25\frac{l}{\bar{h}}\right),\quad \frac{l}{\bar{h}}>1\text{时} \qquad (5.1\text{-}29)$$

$$p=m\sigma'_s\left(0.75+0.25\frac{\bar{h}}{l}\right),\quad \frac{l}{\bar{h}}<1\text{时} \qquad (5.1\text{-}30)$$

式中，l 和 h 可用平均高度法来确定，$m=1.15\sim1.08$。该式适用于型钢轧制。

④ B.K.Смирнов 公式

$$p=1.08n_\mu\sigma'_s \qquad (5.1\text{-}31)$$

式中，n_μ 为与变形区尺寸有关的系数；σ'_s 为金属的流动极限。

系数 n_μ 与变形区尺寸有关，即 $n_\mu=\varphi\left(\frac{l}{\sqrt{h_0h_1}}\right)$。若辊锻时不产生飞边，则可根据变形区长度 l、辊锻前后毛坯的高度 h_0、h_1 计算出 $\frac{l}{\sqrt{h_0h_1}}$ 值，然后从图 5.1-15 中查得 n_μ 值。

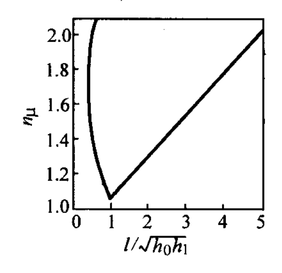


图 5.1-15 n_μ 与 $\frac{l}{\sqrt{h_0h_1}}$ 的关系曲线

若辊锻后产生飞边，则可取 $n_\mu=2.5\sim3.0$。

金属流动极限 σ'_s 可根据辊锻变形温度和应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 从图 5.1-16、图 5.1-17 中查出。应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 按下式确定：

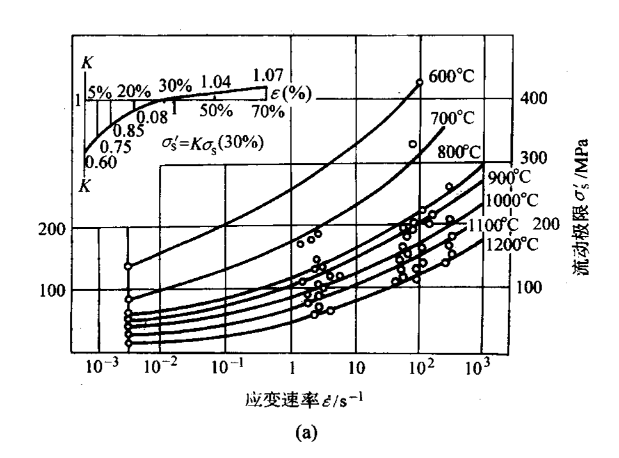
$$\dot{\varepsilon}=\frac{v\Delta h}{lh_0}=0.105n\frac{R\Delta h}{lh_0} \qquad (5.1\text{-}32)$$

式中，v 为模具表面圆周速度；n 为锻辊转速，r/min；R 为辊锻模具半径。

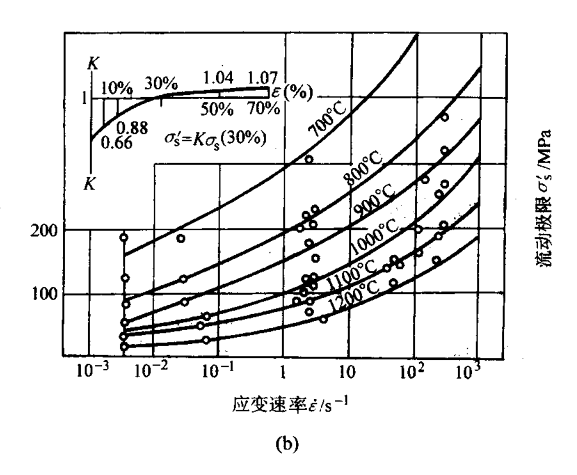
此公式计算平均单位压力较简单且较接近实际，可用于制坯辊锻和成形辊锻。

⑤ И.Я.Тарноский 公式。对于截面形状较简单的锻件，可忽略辊锻时的宽展，其平均单位压力可按下式计算：

$$p=1.15\sigma'_s\left(1+\frac{l}{\Delta h}\ln\frac{\Delta h}{2(\sqrt{h_0h_1}-h_1)}\right) \qquad (5.1\text{-}33)$$



(a)



(b)

图 5.1-16 不同温度和应变速率下 08F 和 40 钢的 σ_s

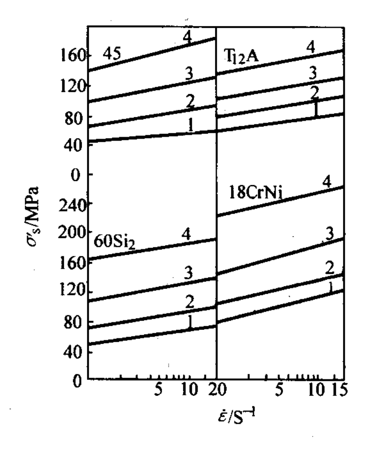


图 5.1-17 不同温度和应变速率下几种钢的 σ_s

1—1 200℃；2—1 100℃；3—1 000℃；4—900℃

对于截面形状复杂并带飞边的锻件，其平均单位压力可按下式计算：

$$p=1.15\sigma'_s\left[1+\frac{1}{6}\left(1+\frac{2}{1+\frac{b_0}{b_1}}\right)(K_\sigma-1)\right] \qquad (5.1\text{-}34)$$

式中的应力状态系数 K_σ 按下式计算：

$$K_\sigma=1+\frac{1}{\alpha}\ln\frac{h_0}{h_1}$$

式中，α 为咬入角。

⑥ 利用经验数值确定辊锻的平均单位压力

a) 成形辊锻碳钢件（其成分的质量分数 C<0.35%，Si<0.3%，Mn<0.7%）的平均单位压力按其锻件复杂程度和辊锻温度不同，按表 5.1-7 确定。

表 5.1-7　成形辊锻的平均单位压力

锻件复杂程度	辊锻温度/℃	平均单位压力/MPa
简单形状	900	250
	1 000	200
复杂形状	900	300
	1 000	250
最复杂形状	900	350
	1 000	300

注：辊锻条件：辊锻模公称直径为 ϕ550 mm，无润滑。

b) 成形辊锻合金钢锻件，其平均单位压力按表 5.1-7 选取后，再按下式修正：

$$p' = p\varphi \qquad (5.1\text{-}35)$$

修正系数 ϕ 根据材料不同，按表 5.1-8 选取。

表 5.1-8　修正系数 ϕ

材料牌号	辊锻温度/℃	
	900	1 000
30CrMnSiA	0.7	0.8
18Cr2Ni4WV	1.0	1.0
2Cr13	1.5	1.3
1Cr17V12	2.0	1.6

当采用润滑剂时会比表中所列实验数据低一些。例如用石墨润滑剂比无润滑时的平均单位压力低 30%～35%。

c) 制坯辊锻的平均单位压力，根据其相对压下量和辊锻温度按表 5.1-9 选取。

表 5.1-9　制坯辊锻的平均单位压力

相对压下量 ε/%	辊锻温度/℃	平均单位压力 p/MPa	
		无润滑	石墨润滑剂
30	1 150	80	60
40	1 150	100	80
50	1 150	120	100
60	1 150	170	130

注：辊锻条件：材料为 50 钢；锻模公称直径为 ϕ500 mm。

(2) 辊锻力矩计算

如图 5.1-12 所示，设辊锻力的作用点到锻辊中心连线的距离为 a，则上下两锻辊的总力矩 M 为：

$$M = 2Pa \qquad (5.1\text{-}36)$$

式中，P 为辊锻力；a 为力臂，$a = \psi l$；l 为变形区长度；ψ 为力臂系数，一般可按下列数值选取：成形辊锻时，ψ = 0.25～0.30；制坯辊锻时，ψ = 0.40～0.60。

3　辊锻工艺与模具设计

3.1　辊锻模结构与材料

(1) 辊锻模结构与固定方式

双支承辊锻机多用扇形结构模具（如图 5.1-18），而悬臂式辊锻机多用圆环形模具（如图 5.1-19）。扇形模具的固定方式有两种。一是其两侧面制成 15°～30°斜度（图 5.1-18a），用楔形压块和螺栓固定在锻辊上（如图 5.1-20）。这种模块结构简单，固定可靠，但装卸和调整模具不太方便，同时由于压块占有一定空间，使锻辊可用宽度减少了。二是其两侧面制成凸凹环形槽（图 5.1-18b），用压环固定在锻辊上（如图 5.1-21）。这种模块装卸和调整模具方便，占用锻辊宽度小，应用较多。

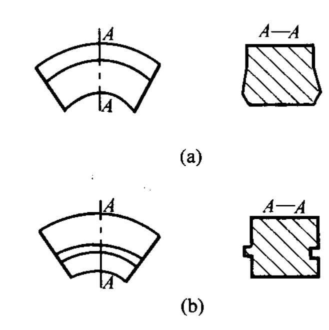


图 5.1-18　扇形辊锻模

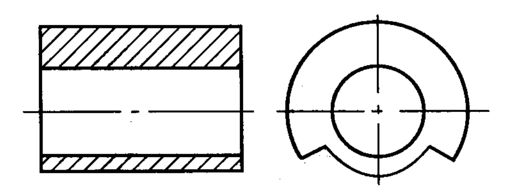


图 5.1-19　圆环形辊锻模

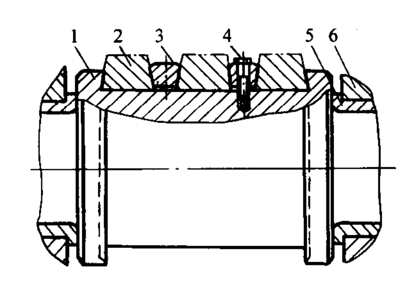


图 5.1-20　扇形模具用压块固定

1—锻辊凸肩；2—扇形模；3—压块；4—螺钉；5—轴瓦；6—机架

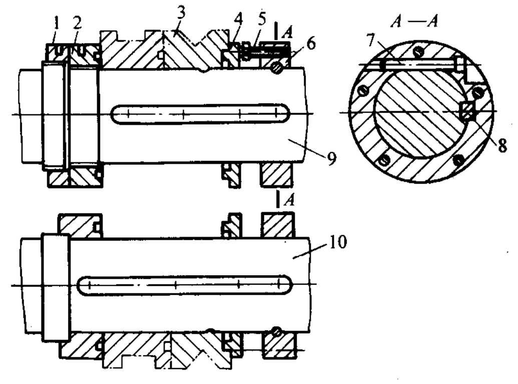


图 5.1-21　扇形模具用压环固定

1—锁紧螺母；2—定位螺母；3—扇形模；4—压环；5—螺钉；6—挡环；7—定位销；8—平键；9—上锻辊；10—下锻辊

圆环形模具的固定方式也有两种。一是用键和压盖进行圆周及轴线方向固定（如图 5.1-22）。这种固定方式结构简单，常用于小规格的辊锻机上。二是用锥套固定模具并作上



下模相对角度调整，如图 5.1-23 所示。锻辊 3 和锥套 5 以 1:20 的锥度相配合，锥套 5 在轴向开有剖口，装入锻辊时由平键 1 导向并作圆周定位。当拧紧螺钉 4 时，锥套 5 连同模具 6 向左移动，依靠锥套涨开、在锥套外表面与模具内表面间产生的摩擦力，将模具固紧。这种固定方式操作简便，但辊锻机结构与加工稍复杂。国产的悬臂式辊锻机大多数采用了这种结构。

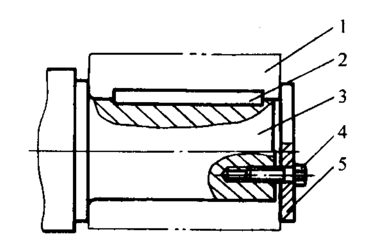


图 5.1-22　圆环形模具用键固定

1—环形模；2—平键；3—锻辊；4—螺钉；5—压盖

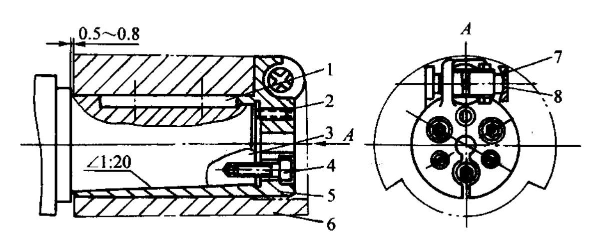


图 5.1-23　圆环形模具用锥套固定

1—平键；2—螺钉；3—锻辊；4—锁紧螺钉；5—锥套；6—环形模；7—球面垫块；8—调整螺杆

(2) 辊锻模尺寸的确定

根据实践经验，模具不同部位的壁厚可按下列各式确定(图 5.1-24)。

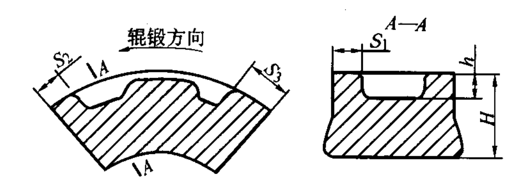


图 5.1-24　模具的壁厚

模具侧面壁厚 S_1：$S_1=(1.1\sim1.5)h_{max}$

模具前端壁厚 S_2：$S_2=h_2$

模具后端壁厚 S_3：$S_3=(1.0\sim1.5)h_3$

模具厚度 H：$H=(2\sim3)h_{max}$

模具宽度 B：$B=b_{max}+2S_1$

模具外圆弧长 L：$L=l_{max}+S_2+S_3$

式中，h_{max} 为型槽单边最大深度；h_2 为型槽前端深度；h_3 为型槽后端深度；b_{max} 为型槽最大宽度；l_{max} 为型槽外圆最大弧长。

(3) 辊锻模材料及选用

辊锻时，金属沿型槽表面尤其是长度方向流动剧烈，易造成型槽表面磨损，同时辊锻模又在反复受热和冷却的条件下工作，模具内部在交变应力的作用下，易形成热疲劳裂纹。因此，要求辊锻模材料在常温和高温下均具有较高的强度、硬度，同时应具有较好的耐热疲劳性能。目前辊锻模常用的材料及应用情况见表 5.1-10。

表 5.1-10　常用辊锻模材料

模具材料	应用情况
3Cr2W8V 5CrNiMo 5CrMnMo 5CrNiTi	用于较复杂形状的成形辊锻模，能承受的变形压力为 250 ~ 350 MPa 或更高
铸钢 高强度铸铁	适用于制坯或形状简单的成形辊锻模，能承受的变形压力为 200 ~ 250 MPa
45	适用于制坯或形状简单、批量不大的成形辊锻模

3.2　制坯辊锻工艺

制坯辊锻工艺的任务是为后续模锻提供合理的毛坯。其设计程序一般为：根据锻件图设计辊锻毛坯图，确定辊锻道次，选择型槽系，计算各道毛坯与型槽截面尺寸，计算型槽的纵向尺寸及变形力等。

(1) 辊锻毛坯设计

设计辊锻毛坯的基础是锻件截面图和计算毛坯图。通常可将截面图按长度上面积不同分成若干特征段，如图 5.1-25 的连杆可分成大头、杆部、小头及过渡区段。辊锻毛坯与之相对应区段的形状设计应遵循如下原则。

1) 截面变化急剧的区段可用等截面代替，如图 5.1-25 的大、小头部，这样可简化型槽形状，便于加工。

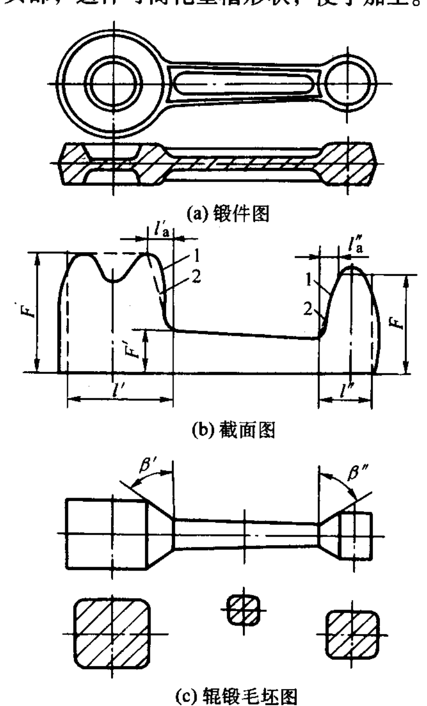


图 5.1-25　辊锻毛坯设计

2) 过渡区段应平滑过渡，以免产生折叠。过渡区段的斜角 β 一般取 45° ~ 60°，或其长度 l'_a 按下式计算：

$$l'_a=(0.5\sim0.86)(\sqrt{F}-\sqrt{F'})\qquad(5.1\text{-}37)$$

式中，F、F' 为过渡区段两个特征截面的面积（图 5.1-25b）。

3) 两端部区段长度应比锻件相应区段长度略短些，这样既便于模锻时放料，又可避免因毛坯过长引起端部折叠。中间部分长度应与锻件相同。



4）为了便于辊锻及后续模锻的送料，辊锻毛坯上应留有夹钳料头。夹钳料头有两种形式：一是利用毛坯不变形的端部作为辊锻时的夹持部位（图5.1-26a、c、d）。为了夹持牢固，端部长度不得小于其边长或直径的1/2。二是在辊锻的最后阶段辊出（图5.1-26中的虚线表示为夹钳料头）。

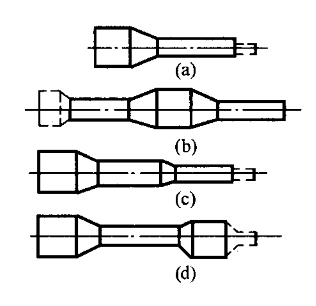


图5.1-26 辊锻毛坯的几种典型形式

（2）辊锻道次确定

根据锻件截面图中的最大截面积计算出原始毛坯的直径或边长，并按标准钢材取值。原始毛坯长度 L_0 按下式计算：

$$L_0=\frac{V_0}{F_0}K_S \tag{5.1-38}$$

式中，V_0 为辊锻毛坯体积；F_0 为原始毛坯横截面积；K_S 为烧损系数。

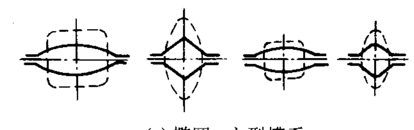
辊锻道次 N 可按下式确定：

$$N=\frac{\ln\lambda_z}{\ln\lambda_p} \tag{5.1-39}$$

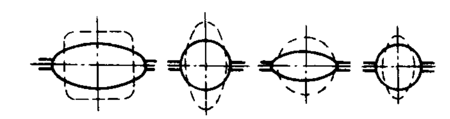
式中，λ_z 为总延伸系数，$\lambda_z=F_0/F_{min}$；F_{min} 为辊锻毛坯中最小横截面积；λ_p 为平均延伸系数，通常取为1.4～1.6。

（3）辊锻型槽系选择

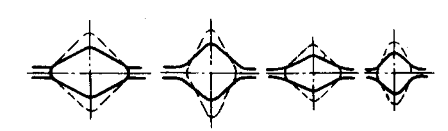
1）辊锻型槽系。制坯辊锻常用的型槽系有椭圆－方、椭圆－圆、菱形－方、六角－方及矩形（箱形）等（图5.1-27），它们的变形特点见表5.1-11。



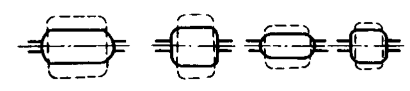
(a) 椭圆－方型槽系



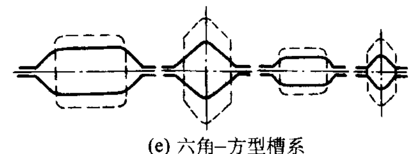
(b) 椭圆－圆型槽系



(c) 菱形－方型槽系



(d) 矩形（箱形）型槽系



(e) 六角–方型槽系

图5.1-27 制坯辊锻常用型槽系

表5.1-11 制坯辊锻常用型槽系变形特点

型槽系	优 点	缺 点
椭圆－方	1）金属四面反复受压，组织与性能均匀 2）延伸系数大，椭圆型槽可达2，方形型槽可达1.8 3）辊锻时坯料不易转动，稳定性较好	沿型槽宽度变形分布不均匀，引起型槽磨损不均匀
椭圆－圆	1）坯料形状转变平稳，可防止产生局部应力 2）坯料冷却均匀，不易产生裂纹，能得到良好的表面 3）适于辊锻塑性较差的金属	1）延伸系数小，一般为1.4～1.5 2）沿型槽宽度变形分布很不均匀 3）椭圆坯料在圆形型槽中的稳定性不好，往往需要导板
菱形－方	1）能得到准确的方形截面 2）沿型槽宽度变形分布较均匀 3）延伸系数较大，一般为1.4～1.8 4）辊锻时稳定性较好	金属只能在彼此垂直的两个方向受压缩，易在角隅处产生缺陷
矩形（箱形）	1）沿型槽宽度变形分布均匀 2）较高的矩形坯料在箱形型槽内辊锻也不易歪扭 3）型槽较浅	1）不能得到精确的方形或矩形 2）坯料只能在两个方向受压缩
六角－方	1）坯料多向受压，有利于提高其组织与性能 2）沿型槽宽度变形分布均匀 3）辊锻时稳定性好	

2）坯料在型槽中辊锻的稳定性。坯料在型槽中辊锻时要求不转动，即稳定性要好，否则辊锻过程无法正常进行。影响稳定性的因素有：型槽与坯料的截面形状、轴长比，以及辊锻模的制造安装精度等。型槽与坯料的截面形状配合关系不同，其稳定性也不同。如表5.1-11所示，椭圆、菱形和六角形坯料进入方形型槽稳定性好，而椭圆－圆、菱形－菱形型槽系的稳定性则较差。坯料长轴与短轴之比对稳定性影响很大。轴长比越大，变形程度就越大，但稳定性越差，因此，欲增大变形量，往往要受到稳定性条件即极限轴长比的限制。常用型槽系的极限轴长比见表5.1-12。

表 5.1-12　常用型槽系许用的坯料极限轴长比

坯料及型槽形状	许用的极限轴长比	备注	坯料及型槽形状	许用的极限轴长比	备注
椭圆坯料进方形型槽	5.0		菱形坯料进菱形型槽	2.5	
椭圆坯料进圆形型槽	3.5		矩形坯料进箱形型槽	2.0	无夹持
椭圆坯料进椭圆型槽	2.5		矩形坯料进箱形型槽	2.5	有夹持

3）辊锻型槽系的选择。可供制坯辊锻选用的型槽系方案见图 5.1-28。

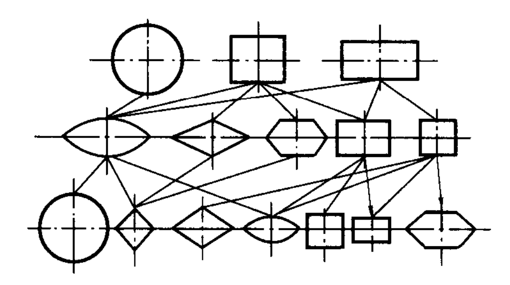


图 5.1-28　制坯辊锻型槽系方案

选择辊锻型槽系时，应考虑以下几项原则。

① 原始毛坯截面形状对型槽系选择关系很大。圆坯因价格便宜最常用，只有批量很大时才能考虑采用方形或矩形毛坯。

② 最后一道型槽形状必须满足辊锻毛坯图的要求。

③ 多型槽制坯辊锻，辊锻完一道移向下一型槽时，往往坯料需要翻转 90°或 45°，所以坯料不允许产生飞边。

(4) 各道型槽横截面尺寸的确定

制坯辊锻大多数采用椭圆 - 方或椭圆 - 圆型槽系，故在此只介绍这两种型槽系尺寸的确定方法。

1）经验法。确定型槽系尺寸的步骤为：

① 根据原始毛坯形状和总延伸率，按表 5.1-13 确定辊锻道次及各道次的延伸率、轴长比、充满系数。

表 5.1-13　辊锻道次及各道次延伸率分配表

工步	一道成形		两道成形			三道成形			四道成形	
型槽系 / 延伸率 λ										
$\lambda_{z(\max)}$	1.2 ~ 1.6	1.3 ~ 1.58	1.8 ~ 3.0	1.8 ~ 3.0	1.5 ~ 2.3	3.0 ~ 4.4	3.0 ~ 4.4	2.4 ~ 3.8	4.4 ~ 6.2	4.4 ~ 6.2
λ_1	1.2 ~ 1.6	1.2 ~ 1.55	1.4 ~ 2.0	1.4 ~ 2.0	1.3 ~ 1.65	1.6 ~ 1.9	1.6 ~ 1.7	1.5 ~ 1.7	1.7 ~ 1.9	1.7 ~ 1.9
λ_2			1.28 ~ 1.5	1.28 ~ 1.5	1.5 ~ 1.6	1.5 ~ 1.65	1.5 ~ 1.65	1.35 ~ 1.6	1.5 ~ 1.65	1.5 ~ 1.65
λ_3						1.25 ~ 1.4	1.25 ~ 1.4	1.22 ~ 1.4	1.4 ~ 1.5	1.4 ~ 1.5
λ_4									1.22 ~ 1.32	1.22 ~ 1.32
椭圆坯轴长比 a	$a_1 \leqslant 2.5$	$a_1 \leqslant 2.5$	$a_1 < 5.0$	$a_1 < 5.0$	$a_1 < 3.5$	$a_1 < 5.0$ $a_2 < 2.5$	$a_1 < 5.0$ $a_2 < 2.5$	$a_1 < 3.5$ $a_2 < 2.5$	$a_1 < 5.0$ $a_1 < 5.0$	$a_1 < 5.0$ $a_2 < 3.5$
椭圆型槽充满系数	$\delta_1 = 0.8$	$\delta_1 = 0.8$	$\delta_1 = 0.9$	$\delta_1 = 0.9$	$\delta_1 = 0.8$	$\delta_1 = 0.9$ $\delta_2 = 0.8$	$\delta_1 = 0.9$ $\delta_2 = 0.8$	$\delta_1 = 0.9$ $\delta_2 = 0.8$	$\delta_1 = 0.9$ $\delta_2 = 0.9$	$\delta_1 = 0.9$ $\delta_2 = 0.8$

② 根据原始毛坯的横截面面积 F_0 和各道延伸率 λ_i 计算出各道辊锻后坯料的横截面面积 F_i：

$$F_i = \frac{F_0}{\lambda_1 \cdots \lambda_i} \tag{5.1-40}$$

③ 对于椭圆型槽（图 5.1-29），其截面尺寸可按下列公式计算：

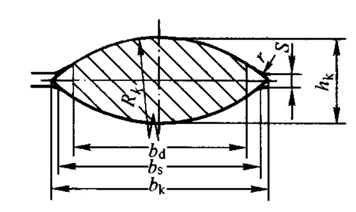


图 5.1-29　椭圆型槽

$\delta = 0.9$ 时
$$h_k = \sqrt{\frac{F}{0.756 + 0.623(a/\delta - 1)}} \tag{5.1-41}$$

$\delta = 0.8$ 时
$$h_k = \sqrt{\frac{F}{0.703 + 0.608(a/\delta - 1)}} \tag{5.1-42}$$

$$b_k = \frac{a h_k}{\delta} \tag{5.1-43}$$

$$R_k = h_k \frac{1 + (a/\delta)^2}{4} \tag{5.1-44}$$

$$S = 2 \sim 4\ \text{mm}$$

$$r = (0.1 \sim 0.2) b_k$$

式中，F、a 分别为椭圆坯料的横截面积、轴长比，δ 为椭圆型槽的充满系数，可由表 5.1-13 查得。

④ 对于圆形型槽（图 5.1-30），在过渡圆角部位有一段与圆周相切的直线，其斜度为 20° ~ 40°。型槽圆角半径一般取 $r = 0.05D$。

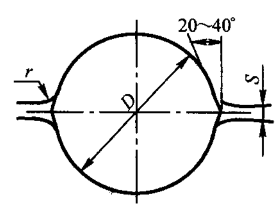


图 5.1-30　圆形型槽

$$D = 1.13\sqrt{F} \qquad (5.1\text{-}45)$$

⑤ 对于方形型槽(图5.1-31)，一般取 $r_1 = 0.15c$，$r_2 = 0.10c$。

$$c = \sqrt{F + 0.86r_1^2} \qquad (5.1\text{-}46)$$

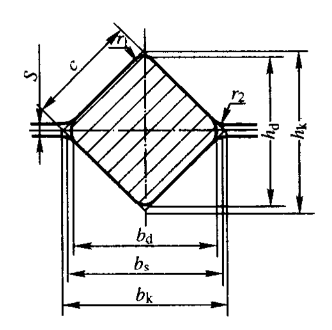


图5.1-31　方形型槽

2）图解法一。对于不同型槽系、不同道次，应用不同的图表。

① 圆–椭圆型槽系的单道次辊锻。已知：锻辊中心距 D_0、原始毛坯横截面积 F_0 和辊锻后坯料截面积 F_1 及型槽充满系数 $\delta = 0.8$。

图解法：

a）求出延伸系数 $\lambda = F_0/F_1$。

b）求出 D_0/d_0（d_0 为原始毛坯直径）。

c）根据 λ 和 D_0/d_0，查图5.1-32，即可求得椭圆毛坯的轴长比 a_1 及压缩系数 d_0/h_1，进而求出 h_1。其他尺寸计算方法同上。

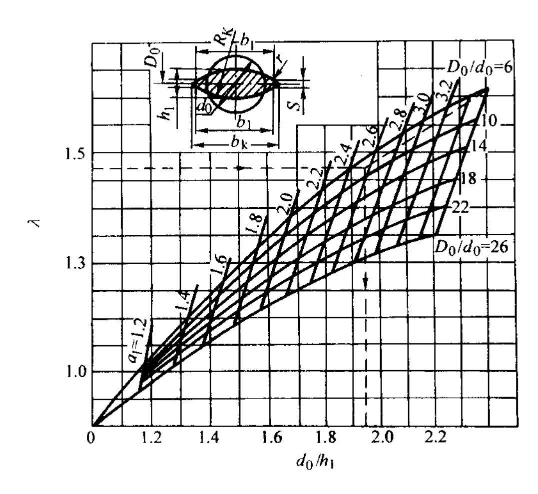


图5.1-32　在椭圆型槽中辊锻圆形毛坯时，椭圆毛坯轴长比 a_1 及压缩系数 d_0/h_1 的确定（$\delta = 0.8$）

② 圆–椭圆–圆型槽系的两道次辊锻。已知：锻辊中心距 D_0、原始毛坯直径 d_0 和辊锻后直径 d_1，椭圆型槽充满系数 $\delta = 0.8$，圆形型槽充满系数 $\delta = 1.0$。

图解法：

a）计算出 D_0/d_1 和 d_0/d_1。

b）查图5.1-33的上部，可求出椭圆毛坯的轴长比 a_1，在图表下部，根据 D_0/d_1 和 a_1，即可确定 h_1/d_1，其他尺寸计算方法同上。

c）圆形毛坯在椭圆型槽中辊锻时的延伸系数 λ_1 可由图5.1-32确定，椭圆毛坯在圆形型槽中辊锻时的延伸系数 λ_2，可用下式求出：

$$\lambda_2 = \frac{d_0^2}{d_1^2\lambda_1} \qquad (5.1\text{-}47)$$

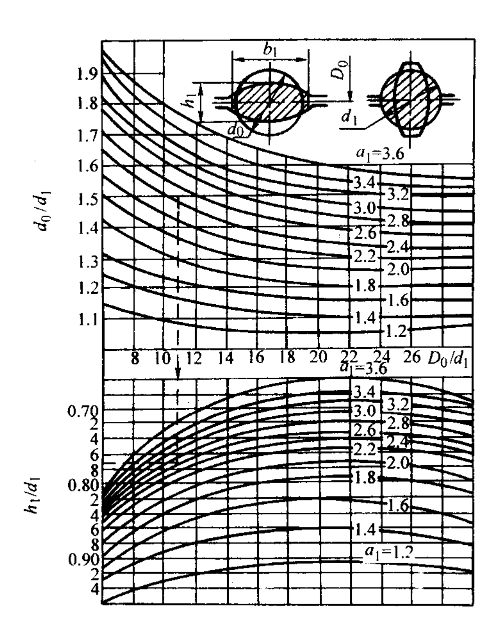


图5.1-33　在圆–椭圆–圆型槽系两道次辊锻时，椭圆毛坯尺寸的确定

（椭圆型槽 $\delta = 0.8$，圆形型槽 $\delta = 1.0$）

③ 圆–椭圆–方型槽系的两道次辊锻。已知：锻辊中心距 D_0、原始毛坯直径 d_0 和辊锻后边长 c_1，椭圆和方形型槽充满系数 $\delta = 0.9$。

图解法：

a）计算出 D_0/h_{k2} 和 d_0/h_{k2}（h_{k2} 为方形型槽的理论高度及宽度）。

b）查图5.1-34的上部，可求出椭圆毛坯的轴长比 a_1，在图5.1-34下部，根据 D_0/h_{k2} 和 a_1，即可确定 h_1/h_{k2}，其他尺寸计算方法同上。

c）圆形毛坯在椭圆型槽中辊锻时的延伸系数 λ_1 可由图5.1-32确定，椭圆毛坯在方形型槽中辊锻时的延伸系数 λ_2，可用下式求出：

$$\lambda_2 = \left(\frac{h_1}{h_{k2}}\right)^2 [1.41(a_1 + 0.19)] \qquad (5.1\text{-}48)$$

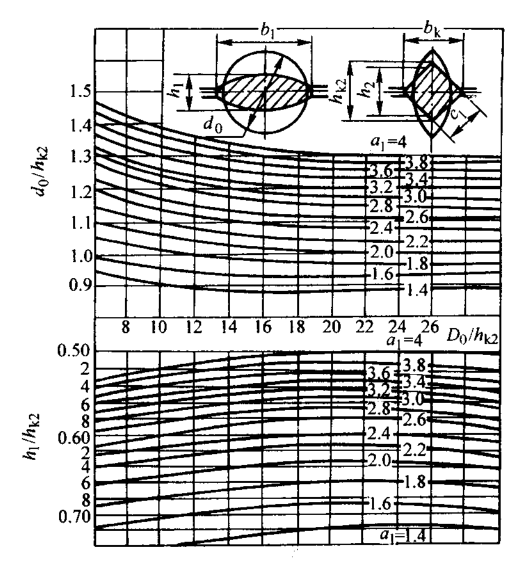


图5.1-34　在圆–椭圆–方型槽系两道次辊锻时，椭圆毛坯尺寸的确定

（椭圆和方型槽充满系数 $\delta = 0.9$）



④ 方－椭圆型槽系的单道次辊锻。已知：锻辊中心距 D_0、原始毛坯横截面积 F_0 和辊锻后坯料截面积 F_1，方形毛坯边长 c_0 及型槽充满系数 $\delta=0.8$。

图解法：

a）求出延伸系数 $\lambda=F_0/F_1$ 和参数 D_0/c_0。

b）查图 5.1-35，即可求得椭圆毛坯的轴长比 a_1 及压缩系数 c_0/h_1，进而求出 h_1。其他尺寸计算方法同上。

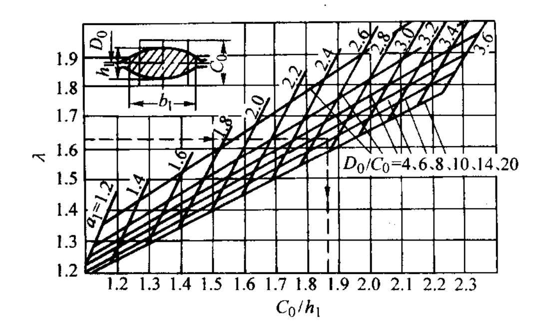


图 5.1-35 在椭圆型槽中辊锻方形毛坯时，椭圆毛坯轴长比 a_1 及压缩系数 c_0/h_1 的确定（$\delta=0.8$）

⑤ 方－椭圆－圆型槽系的两道次辊锻。已知：锻辊中心距 D_0、原始毛坯边长 c_0 和辊锻后直径 d_1，椭圆型槽充满系数 $\delta=0.8$，圆形型槽充满系数 $\delta=1.0$。

图解法：

a）计算出 D_0/d_1 和 c_0/d_1。

b）查图 5.1-36 的上部，可求出椭圆毛坯的轴长比 a_1，在图 5.1-36 下部，根据 D_0/d_1 和 a_1，即可确定 h_1/d_1，其他尺寸计算方法同上。

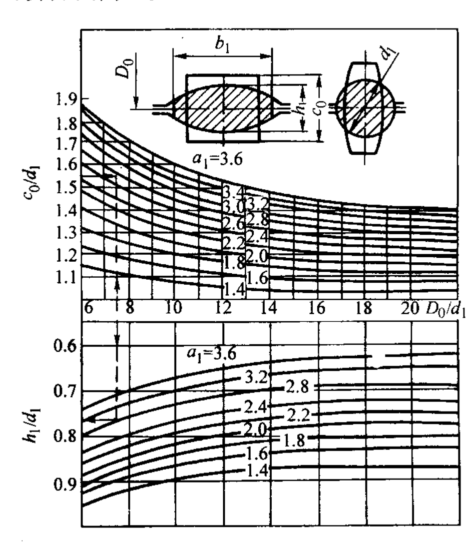


图 5.1-36 在方－椭圆－圆型槽系两道次辊锻时，椭圆毛坯尺寸的确定（$\delta=0.8$）

⑥ 方－椭圆－方型槽系的两道次辊锻。已知：锻辊中心距 D_0、原始毛坯边长 c_0 和辊锻后边长 c_1，椭圆和方形型槽充满系数 $\delta=0.9$。

图解法：

a）计算出 D_0/h_{k2} 和 c_0/h_{k2}（h_{k2} 为方形型槽的理论高度及宽度）。

b）查图 5.1-37 的上部，可求出椭圆毛坯的轴长比 a_1，在图 5.1-37 下部，根据 D_0/h_{k2} 和 a_1，即可确定 h_1/h_{k2}，其他尺寸计算方法同上。

⑦ 圆－椭圆－立椭圆型槽系两道次辊锻（图 5.1-38）。椭圆坯料在圆型槽中辊锻时，如其轴长比大于 3，就易于失稳而产生废品。而用立椭圆型槽代替圆型槽，即使椭圆坯料轴长比大于 4，仍能保证可靠的稳定性。

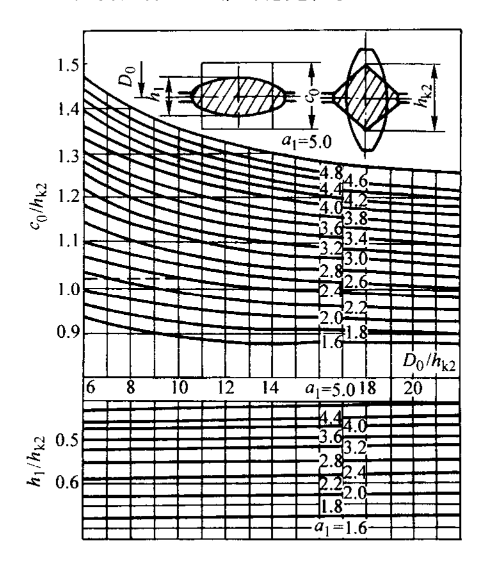


图 5.1-37 在方－椭圆－方型槽系两道次辊锻时，椭圆毛坯尺寸的确定（$\delta=0.9$）

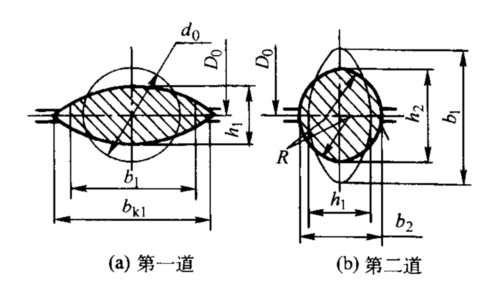


图 5.1-38 圆－椭圆－立椭圆型槽系

已知：锻辊中心距 D_0、原始毛坯直径 d_0 及截面积 F_0、辊锻后立椭圆截面积 F_2，并给定平椭圆型槽充满系数 $\delta_1=0.9$，立椭圆型槽充满系数 $\delta_2=1.0$，立椭圆型槽的轴长比 $a_2=b_2/h_2=0.8$。

图解法：

a）按下式计算出立椭圆的高度：

$$h_2=\sqrt{\frac{F_2}{0.62a_2^2\left(0.23+\frac{1}{a_2}\right)}} \tag{5.1-49}$$

b）计算总延伸率 $\lambda_z=F_0/F_2$ 及 D_0/h_2。

c）查图 5.1-39 确定平椭圆型槽的轴长比 a_1 及椭圆型槽压缩系数 d_0/h_1。图 5.1-39 使用方法如箭头所示：先在横坐标上找到计算出的 D_0/h_2 值，向上作垂线并与相应的 λ_z 值水平线相交，求出在实线上的 a_1 值，然后继续向上在虚线上找到相应的 a_1 值作水平线交于图表右侧纵坐标，即得 d_0/h_1 值。

d）按下列公式计算出立椭圆型槽尺寸：

立椭圆圆弧半径 $$R_k=\frac{h_2a_2(1+a_2^2)}{4} \tag{5.1-50}$$

立椭圆宽度 $$b_2=a_2h_2 \tag{5.1-51}$$

立椭圆圆角半径 $$r_1=0.25b_2 \tag{5.1-52}$$

$$r_2=0.2b_2 \tag{5.1-53}$$

e）平椭圆型槽其他尺寸计算同前。

f）计算各道延伸系数：



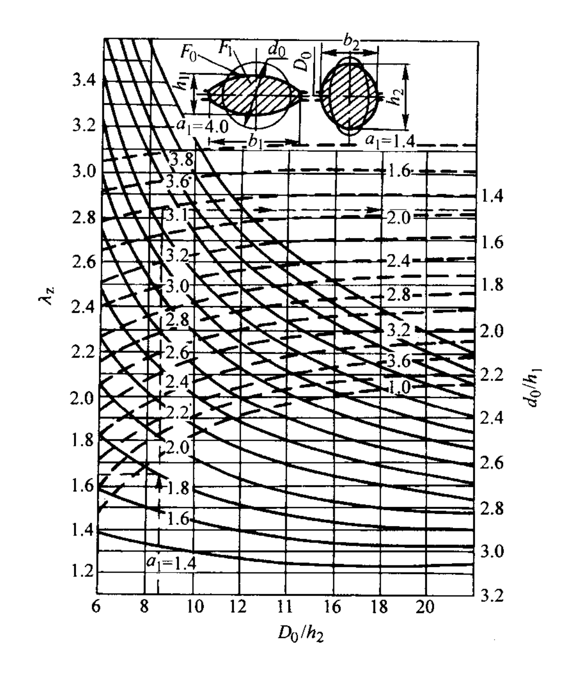


图 5.1-39　圆－椭圆－立椭圆型槽系确定 a_1 及 d_0/h_1

$$\lambda_1 = \frac{1.12}{0.16 + a_1}\left(\frac{d_0}{h_1}\right)^2 \qquad (5.1\text{-}54)$$

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} \qquad (5.1\text{-}55)$$

⑧ 上述型槽系的四道次辊锻。四道次辊锻可以分解为两个两道次辊锻，关键在于求出第二道辊锻后坯料直径或边长，其确定方法为：

$$\lambda_z = \lambda_{1-2} \times \lambda_{3-4}$$

$$\lambda_{1-2} = (1.2 \sim 1.3)\lambda_{3-4}$$

$$F_2 = \frac{F_0}{\lambda_{1-2}} = \frac{F_0}{\sqrt{(1.2 \sim 1.3)\lambda_z}}$$

$$c_2 = \sqrt{F_2} \quad 或 \quad d_2 = 1.13\sqrt{F_2} \qquad (5.1\text{-}56)$$

求出第二道辊锻坯料直径或边长后，即可按上述方法确定出第一道和第三道椭圆型槽的尺寸。

3）图解法二。图 5.1-40 适用于 1 100～1 200℃的辊锻温度，用于确定方形（圆形）－椭圆－方形（圆形）型槽的尺寸和截面积。图的左边列出验算数值的公式，右边给出截面减小系数。图中阴影线表示的极限截面减小系数适用于碳钢，对于合金钢，应适当增大系数，后几道次截面减小系数也应适当增大，以便保持工件表面光洁。

图 5.1-40 使用方法：从 11 或 12 中的原始毛坯截面尺寸为起点，在一条垂直线上读取 21 和 22 区中的椭圆高度和宽度以及 3 区中的方形边长。然后从 41 中查得方形截面面积，从 42 中查得椭圆截面面积。如果辊锻两道次后尚未达到所要求的尺寸，就应从 11 重新开始来确定其他道次型槽尺寸。

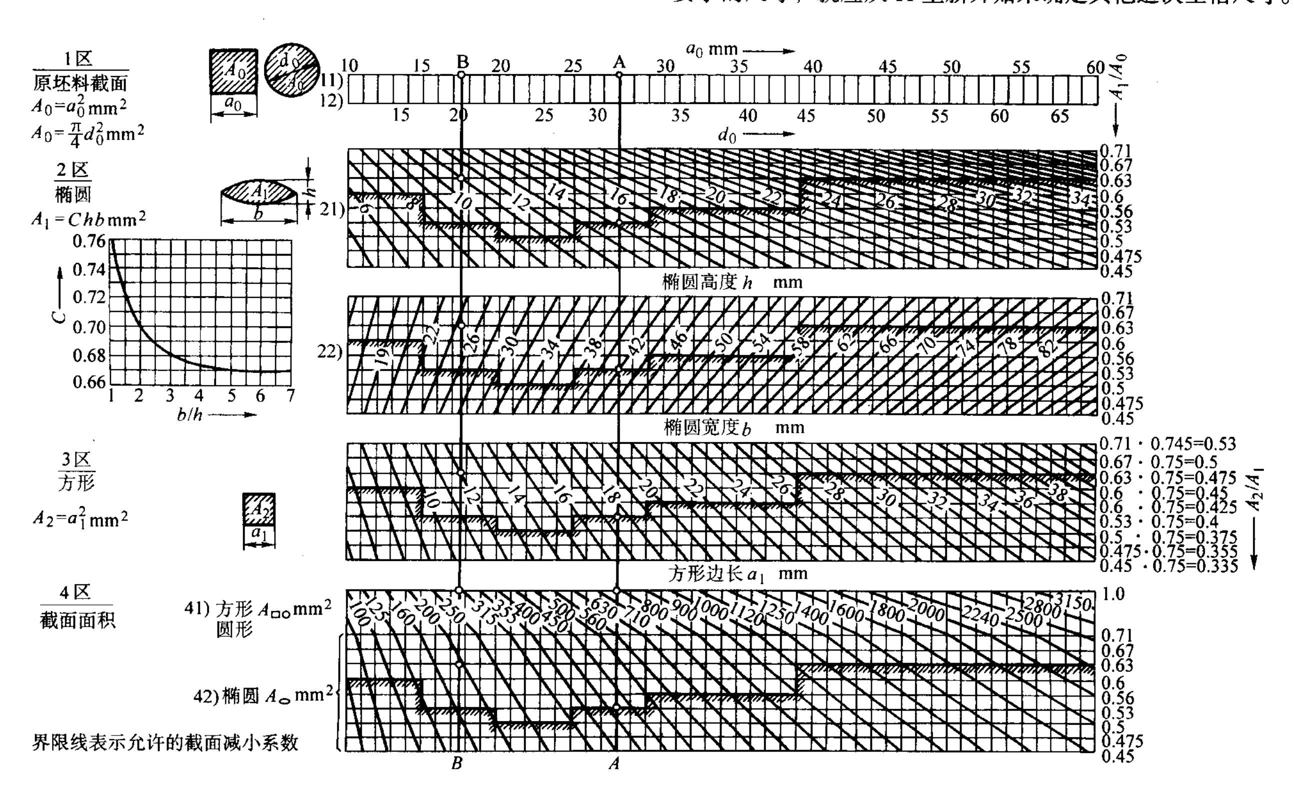


图 5.1-40　方形（圆形）－椭圆－方形（圆形）型槽系线解图

（5）型槽纵向尺寸的确定

1）辊锻毛坯过渡区段长度（图 5.1-41）。可以认为各道次辊锻时过渡区段的体积保持不变。因为：

$$V = \frac{L}{3}\left(F_a + \sqrt{F_a F_b} + F_b\right)$$

式中，F_a、F_b 为楔形区段边界上的两个横截面积；L 为楔形区段长度。

故各道毛坯的楔形区段长度可按下式由后往前推算：

$$L_{n-1} = L_n \frac{(F_a + \sqrt{F_a F_b} + F_b)_n}{(F_a + \sqrt{F_a F_b} + F_b)_{n-1}} \qquad (5.1\text{-}57)$$

2）型槽纵向长度尺寸的确定。由于前滑，型槽底部的长度应比毛坯相应区段的长度短些，即

$$L_k = \frac{L_a}{1+S} \qquad (5.1\text{-}58)$$

式中，S 为前滑值，在等截面区段可取为 4%～6%，在减压

下辊锻区段可取为2%～4%，在增压下辊锻区段可取为6%～12%；L_k 为型槽底部的长度；L_a 为毛坯相应区段的长度。

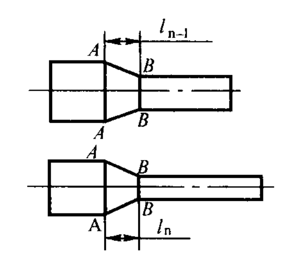


图 5.1-41　辊锻毛坯过渡区段长度

型槽区段所对应的中心角 θ（rad）：

$$\theta = \frac{L_k}{R_z} = \frac{L_a}{R_z\ (1+S)} \tag{5.1-59}$$

式中，R_z 为型槽作用半径，$R_a = \frac{D_0 - h}{2}$；h 为型槽高度，如果型槽高度是连续变化的，则作用半径可按平均值计算。

辊锻模具的纵向总长度取决于型槽各区段长度之和（图5.1-42），即

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \cdots + 0.175 \sim 0.262 \tag{5.1-60}$$

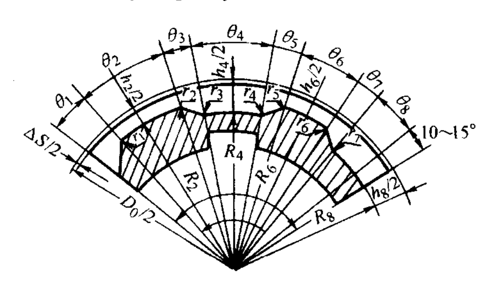


图 5.1-42　辊锻模型槽纵向剖面

模具中心角增加10°～15°的目的在于容纳辊锻过程中可能出现的多余金属。对于悬臂式辊锻机，模具包角一般不大于270°，对于双支承辊锻机，模具包角一般不大于180°。模具型槽各区段间应圆滑过渡，所取圆角半径视具体情况而定。

3.3　成形辊锻工艺

（1）成形辊锻件的分类

成形辊锻适用于生产需要延伸工序的长轴类锻件如连杆、前轴、扳手、叶片等和截面变化不显著的扁宽类锻件如履带节、链环、锄头等。成形辊锻件分为四类（表5.1-14）。

1）板片类辊锻件。这类辊锻件为一薄片或具有薄片部分，可用辊锻进行展宽辗片获得。辊锻生产中，还可将这类辊锻件按如下分为Ⅰ、Ⅱ两组。

Ⅰ组：扭曲变截面的板片类如各类叶片、犁铧等。

Ⅱ组：平直变截面的板片类如锄头、铁锹板、餐刀、甘蔗刀、炮弹尾翼、医用镊子等。

2）长轴突变截面类辊锻件。辊锻件主轴线尺寸大于其他两个方向尺寸，截面沿轴线是变化的。辊锻时，金属主要沿轴线方向流动，变形复杂，成形较为困难。按形状复杂程度，也可分为如下两组。

① 形状复杂的Ⅱ组如连杆、前轴等。

② 形状简单的Ⅰ组如活扳手、锉刀等。

3）长轴扁宽类辊锻件。辊锻件主轴线尺寸大于其他两个方向的尺寸，但宽度尺寸与主轴线尺寸相近，高度尺寸较小。在辊锻变形中需要具有一定的展宽量，如链轨节、刮扳运输机侧环、链环等。

4）单纯拔长类辊锻件。这类辊锻件具有各种截面形状的细长杆部，辊锻时，要求具有很高的延伸率。如剪刀的杆部、钢叉的叉齿部分、变速操纵杆和十字镐两头的尖扁部分等。

（2）辊锻件图设计

辊锻件图设计内容与常规模锻件图设计相似，如合理选择分模面、确定余量和公差、圆角半径、模锻斜度、冲孔连皮形状和尺寸等。由于辊锻时模具作回转运动，而工件作直线运动，为了防止模具与工件间发生干涉，应特殊考虑如下一些问题。

表 5.1-14　辊锻件工艺性基本分类

类别	组　别	辊锻件图例	工艺方法
板片类	Ⅰ，扭曲变截面	A A A—A	成形辊锻
	Ⅱ，平直变截面		成形辊锻
长轴突变截面锻件	Ⅰ，形状简单		成形辊锻
	Ⅱ，形状复杂		初成形辊锻
扁宽类	Ⅰ，形状简单		成形辊锻
	Ⅱ，形状复杂		初成形辊锻

续表 5.1-14

类别	组 别	辊锻件图例	工艺方法
单纯拔长类			杆部、叉齿部分成形辊锻

1）前壁斜度 β_1（图 5.1-43）。由于前滑，工件出口速度大于模具圆周速度，所以前壁出模困难，应有较大的斜度。其大小可根据型槽单边深度 h 和辊锻温度 t 按表 5.1-15 选取。

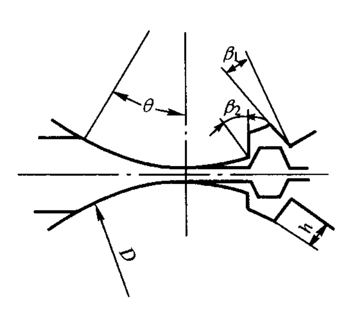


图 5.1-43 成形辊锻的前壁斜度及后壁斜度

表 5.1-15 辊锻前壁斜度的选择 / (°)

型槽单边深度 h/mm 辊锻温度 t/℃	<5	6～10	11～15	16～25
1 100	10	12	15	20
1 000	12	15	18	24
900	15	18	20	28
800	18	20	24	—

2）后壁与侧壁斜度 β_2（图 5.1-43）。由于辊锻件比较容易从后壁与侧壁脱模，因此其斜度可以取得小些。其大小可根据型槽单边深度 h 按表 5.1-16 选取。

表 5.1-16 辊锻后壁与侧壁斜度的选择

型槽单边深度 h/mm	<10	11～25	26～35
斜度 β/ (°)	5	7	10

3）圆角半径。当辊锻件上小截面至大截面的前壁轮廓过渡处如连杆杆部至小头过渡处圆角半径较小时，模具极易刮伤工件（图 5.1-44），所以应增大该处圆角半径，一般取 $R = 30 \sim 40$ mm。辊锻件其他部位的内外圆角半径（图 5.1-45）可根据锻件高度 h 按下式确定：

$$r = 0.06h + 0.5 \text{ mm} \quad (5.1\text{-}61)$$

$$R = (3.5 \sim 4)r + 0.5 \text{ mm} \quad (5.1\text{-}62)$$

型槽边缘到分模面处圆角半径 R_1 通常可取为 1.5～3 mm。

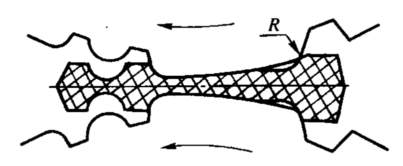


图 5.1-44 过渡处圆角半径

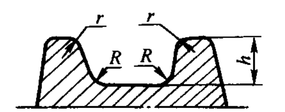


图 5.1-45 辊锻件其他部位的内外圆角半径

4）冲孔连皮。辊锻件多采用弧形底的连皮（图 5.1-46），很少采用平底连皮。

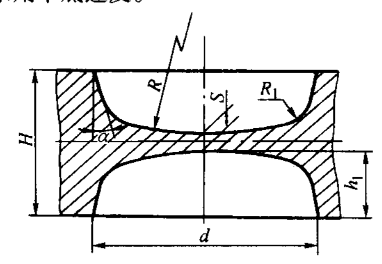


图 5.1-46 冲孔连皮

冲孔连皮的厚度 S 可根据锻件高度 H 按下式确定：

$$S = 0.1H + 0.5 \text{ mm} \quad (5.1\text{-}63)$$

底面圆弧 R 为：

$$R = d + (15 \sim 20) \text{ mm} \quad (5.1\text{-}64)$$

连皮四周圆角半径 $R_1 = 8 \sim 10$ mm

连皮四周斜度 $\alpha = 15° \sim 20°$

由于辊锻成形的特殊性，辊锻件的结构参数应按上述原则选取。如不能满足使用要求，可在辊锻后采用小吨位压力机进行局部小量的整形，以达到锻件的要求。

（3）成形辊锻型槽设计

对于厚度较小、形状简单的锻件，可以采用单个型槽成形，甚至可以在模具刻上多个相同型槽，一次辊锻出多个锻件。对于形状较复杂、沿纵向截面积变化较大的锻件，一般须用制坯型槽、预成形型槽、终成形型槽进行多道次辊锻。

1）终成形型槽设计。终成形型槽设计的依据是热辊锻件图。设计时须考虑下列几点。

① 尺寸设计。型槽宽度和高度尺寸一般按热辊锻件图确定。型槽长度尺寸应考虑前滑的影响，比热辊锻件图的相应尺寸短一些，计算方法同制坯辊锻，前滑值按表 5.1-3 选取。

② 形位设计。型槽主轴线应与模块主轴线平行，左右模壁厚度尽量均衡。对于上下不对称型槽，为了避免辊锻件出模时上下弯曲，应将型槽截面重心布置在上下锻辊中心的平分线（即轧制线）上，如图 5.1-47 所示。

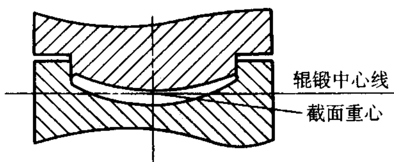


图 5.1-47 在闭式型槽中辊锻非对称件



对于左右厚度不等的锻件如叶片、犁铧，或长度较大的锻件如变截面板簧片、履带板，由于左右压下量不均或工艺因素的影响，若采用开式型槽，极易造成锻件水平弯曲（侧弯），因此多采用闭式型槽（图 5.1-47）。

2）预成形型槽设计。与终成形型槽设计相似，预成形型槽设计的依据是预成形辊锻件图。预成形型槽的高度及宽度与预成形辊锻件图相同，而其长度应考虑前滑的影响按公式计算。设计预成形辊锻件图时，应考虑如下一些原则。

① 预成形毛坯各特征段的体积一般应与终成形辊锻件相应区段体积相等。对于形状复杂区段如连杆大头区段，为了确保终辊时充满良好，预成形体积可增大 10%。

② 预成形辊锻件上各截面要比相应终成形型槽截面窄一些、高一些（图 5.1-48），以便预成形后的毛坯能顺利进入终成形型槽，并造成镦粗法成形避免挤入法成形的变形条件，即：

$$b_d = B_d - (2 \sim 6)\ \text{mm}$$

$$b_f = B_f$$

$$R_1 = R + (2 \sim 5)\ \text{mm}$$

式中，b_d、B_d 为预成形和终成形型槽截面顶面宽度；b_f、B_f 为预成形和终成形型槽截面分模面宽度；R_1、R 为预成形和终成形型槽截面相应圆角半径。

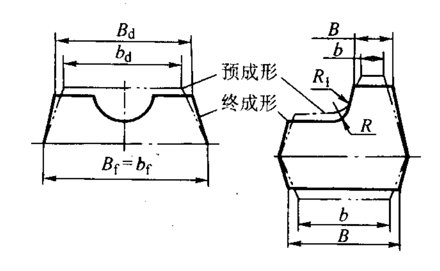


图 5.1-48　预成形毛坯截面设计

③ 为了避免终辊时工件水平弯曲，预成形毛坯应尽可能满足终辊时左右两边相对压下量均衡一致的原则。

④ 预成形的变形程度应尽可能大一些，以减小终辊成形的变形程度，避免终辊成形时金属剧烈流动、加剧终辊型槽磨损，提高锻件表面质量。例如辊锻变截面板簧片时，预成形的相对压下量比终成形大 80% ~ 100%。

⑤ 对于工字形截面，预成形毛坯可按下列两种情况设计。

当 $H/B > 2$ 时，毛坯截面可设计成中部带凹槽的箱形（如图 5.1-49）。

$$b_d = B_d - (2 \sim 6)\ \text{mm}$$

$$b_f = B_f$$

$$\text{凹槽深度} = (2/5)h$$

当 $H/B \leqslant 2$ 时，毛坯截面可设计成箱形，不宜设计成椭圆形。

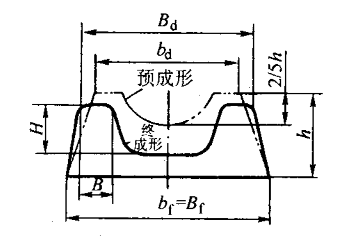


图 5.1-49　工字形截面设计

⑥ 预成形毛坯形状应尽量简化，尽可能设计成对称形，以便简化模具加工，方便操作，如不对称连杆，其预成形毛坯可设计成对称形（见图 5.1-62）。

3）制坯型槽设计。制坯型槽的主要作用是完成金属的体积分配，保证预成形或终成形时各特征段体积大致相等，四周飞边基本均匀。制坯型槽设计应注意下列一些问题。

① 制坯型槽的形状应更简单，各区段间应该用较大的斜度或圆弧相连接，以免下一道辊锻时产生折叠。

② 如在制坯型槽辊锻后须沿轴线旋转 90°进入下一个型槽，则不允许制坯辊锻时出现飞边。

③ 要保证制坯辊锻后的坯料进入下一个型槽时，有较好的对中性和辊锻稳定性。例如连杆辊锻时，其预成形型槽的杆部和小头均为箱形型槽，因此，制坯型槽最好采用扁菱形。这种形状的坯料旋转 90°后进入预成形型槽时有很好的对中性和稳定性（图 5.1-50），其中部与两侧的高度分别为：

$$H_1 = b_f - (4 \sim 8)\ \text{mm}$$

$$h_1 = b_d - (6 \sim 10)\ \text{mm}$$

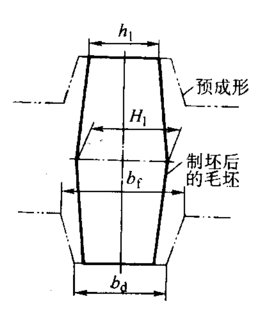


图 5.1-50　制坯辊锻后的坯料进入预成形型槽图

4　辊锻机

4.1　辊锻机的工作原理

辊锻机的工作原理如图 5.1-51 所示。辊锻模 2 固定在锻辊 1 上，电动机 7 经传动带 5、齿轮副 8 和 4 减速后，再通过齿轮副 3 带动上下锻辊作等速反向旋转。通常，在辊锻机上还有摩擦离合器 6 和制动器 9，以获得点动、单动、连动等多种操作规范。

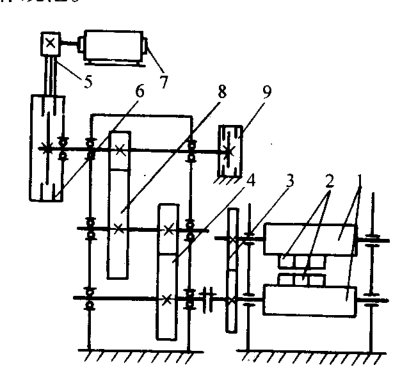


图 5.1-51　辊锻机工作原理

1—锻辊；2—辊锻模；3、4、8—齿轮副；5—传动带；6—摩擦离合器；7—电动机；9—制动器

随着辊锻工艺迅速发展与广泛应用，辊锻机的设计、制造和系列化等都有很大进展。今后的发展趋向是辊锻机与机械手组合成全自动辊锻机组。使用自动辊锻机组可大大减轻工人的劳动强度，减少生产人员，提高生产率，稳定产品质量。辊锻机的另一个发展趋势是不断改进辊锻机结构，提高辊锻机的精度与刚性。

4.2　辊锻机的类型

辊锻机根据不同的分类方法，可分为以下几种类型。



1）根据锻辊结构形式可分为悬臂式、双支承式及复合式辊锻机，这是主要分类方法。悬臂式辊锻机（见图5.1-52），锻辊的工作部分悬伸在机身之外，环形辊锻模可从锻辊端部套入，固定与更换模具都较方便，可在其前面和侧面进行操作，最适于完成毛坯的横向展宽工作。其缺点是刚性较差。多用于制坯，并与模锻设备配套组成流水线，进行大批量生产。

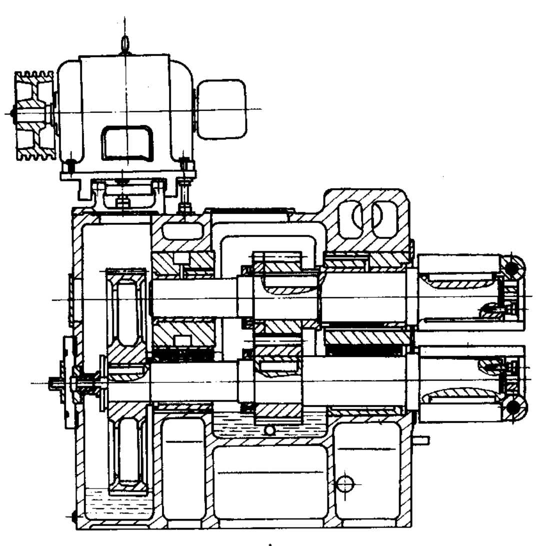


图5.1-52　悬臂式辊锻机

双支承式辊锻机的锻辊工作部分是用轴承支持在两个直立的机架中，刚性好，可用于制坯辊锻、成形辊锻或冷辊锻。锻辊上可装多副模具进行多型槽辊锻，应用范围广，既适于大批量生产，又可用于中小批量生产。图5.1-53所示为其结构简图。

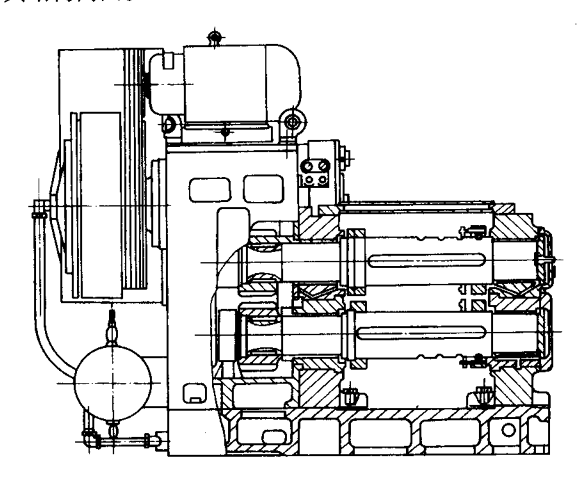


图5.1-53　双支承式辊锻机

复合式辊锻机兼有悬臂式和双支承式两者的特点，通用性较强。其锻辊由两部分组成，支承在两机架之间的部分称为内辊，悬伸在机架外的为外辊（图5.1-54）。外辊除了能完成辊锻工序外，还可以进行切断、压弯及校直等辅助工序，也可用于驱动辊锻操作机。但其结构较复杂。

2）根据送料方向可分为卧式、立式与斜式辊锻机。一般的辊锻机都是在水平方向送料，这种形式的辊锻机称为卧式辊锻机。在其前后两面均可操作，进出料都方便，适于辊制中小型毛坯或锻件，是现有辊锻机的一种主要结构形式。在卧式辊锻机上辊锻特长的锻件时，炽热的毛坯受自重作用很容易弯曲并使送料夹钳承受很大的弯矩。为克服上述缺点，将两锻辊布置在同一水平面内，坯料在两辊上方沿铅垂方向往下送入，辊锻时将坯料咬入而向上运动，这种辊锻机称为立式辊锻机（图5.1-55）。当对辊锻件有特殊要求时，可将两锻辊中心线所在的平面与水平面成45°角布置。辊锻时，可在斜下方送入坯料，辊出的锻件靠自重由接料台中滑回，再转送下一工序，这种辊锻机称为斜式辊锻机（图5.1-56）。

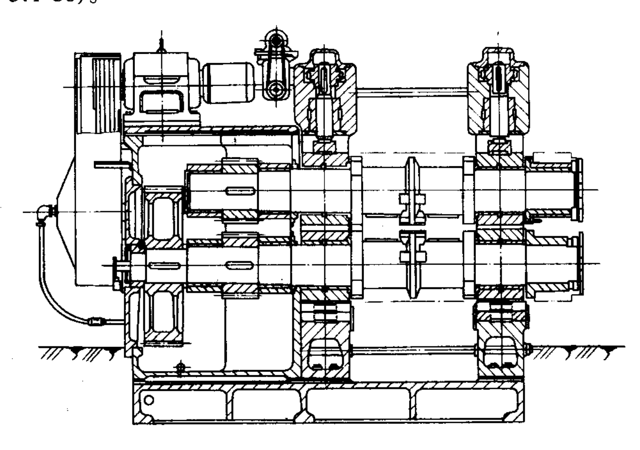


图5.1-54　复合式辊锻机

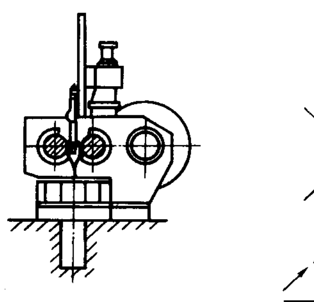


图5.1-55　立式辊锻机

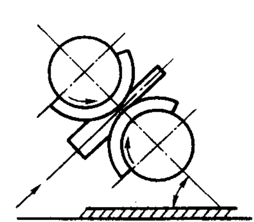


图5.1-56　斜式辊锻机

3）根据传动部分与工作部分的相对位置可分为整体式、分置式辊锻机。辊锻机的工作部分与传动部分都安装在同一机身或底座上时，称为整体式辊锻机，见图5.1-52～图5.1-54。整体式辊锻机的结构紧凑，占地面积小，多用于悬臂式及中小规格的双支承式或复合式辊锻机上。对于大规格的辊锻机，为便于制造、维修及运输，可将传动部分与工作部分分开，然后用联轴器加以联接，这种结构的辊锻机称为分置式辊锻机（图5.1-57）。

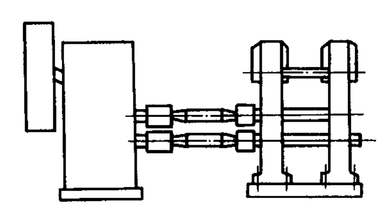


图5.1-57　分置式辊锻机

4）根据用途可分为通用和专用辊锻机。一般没有特殊工艺要求的毛坯或锻件可采用适于一般热辊锻的通用辊锻机。这类辊锻机已系列化，且成批生产，成本低，质量好。为适应一些批量大并有特殊工艺要求的辊锻件，研制了一些高效率的专用辊锻机，如专为辊制锄头用的锄头专用机和冷成形辊锻叶片的叶片冷辊锻机等。

4.3　辊锻机的技术参数

辊锻机的技术参数标志着它的规格、性能和主要用途

等，是设计和选用辊锻机的重要依据。辊锻机的主要技术参数有：锻模公称直径 D、公称压力 P、锻辊直径 d、锻辊可用长度 B、锻辊转速 n、锻辊中心距调节量 ΔA 及可锻方坯边长 H 等，见图 5.1-58。

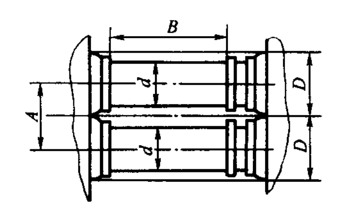


图 5.1-58　辊锻机部分技术参数

1）锻模公称直径 D。锻模公称直径是指锻模分模面处的公称回转直径，其值等于两锻辊的公称中心距 A。锻模公称直径选取得越大，金属越易咬入。但增大公称直径后，变形区尺寸随之增大，导致辊锻力能参数明显提高，不仅使辊锻机尺寸增大，还使辊锻时的能耗上升。故对一定的辊锻件来说，必须合理地选定锻模公称直径，使之既能满足辊锻工艺要求，又要设备结构合理。

选择锻模公称直径的方法可按辊制锻件的尺寸、形状用类比法确定，也可根据选用的坯料直径 d_0 作概略的计算。

制坯辊锻时

$$D=(6\sim8)d_0$$

成形辊锻时

$$D=(8\sim15)d_0$$

式中，d_0 为坯料直径，mm。

2）公称压力 P。公称压力是指机器所能承受的最大锻辊径向负荷值。它是设计和选用机器的主要依据，并与锻模公称直径相适应。

3）锻辊直径 d。锻辊直径是指安装辊锻模处的锻辊直径。锻辊直径的大小决定了辊锻模的厚度尺寸与锻辊的刚性。

4）锻辊可用长度 B。锻辊可用长度是指锻辊上不包括两端夹紧固定装置在内的可供安装模具部分的轴向长度，其数值大时，虽能安装的模具数量多，提高了通用性，但却减小了锻辊的刚性。故锻辊的可用长度不宜过大，通常取 $B=D$。

5）锻辊转速 n。制坯辊锻和成形辊锻对转速有不同的要求。前者的转速应与其配套模锻设备的行程次数相协调，并尽可能地适应手工操作时的连续运转要求。成形辊锻时，锻辊转速要与其送料装置相适应，保证送料准确可靠，其锻辊转速以较制坯辊锻低些为宜。

6）锻辊的中心距调节量 ΔA。锻辊中心距调节量是指两锻辊中心距的调节范围，其数值视机器调节机构的形式而异。ΔA 一般为 10～20 mm。

7）可锻方坯边长 H。这一参数在一定程度上反映了辊锻机力能的大小。通常可取

$$H=\frac{D}{6\sim8}$$

为适应辊锻工艺不断发展并便于设计、制造、选用与维修等，我国已制定出部分辊锻机的标准系列参数。表 5.1-17 列入双支承式辊锻机技术参数。

表 5.1-18 列入悬臂式辊锻机技术参数。复合式辊锻机目前只生产 D43－630 一种，其技术参数见表 5.1-19。

表 5.1-17　双支承式辊锻机技术参数（摘自 JB/T 2403.1—1996）

参数名称	型号						
	D42－160①	D42－250	D42－400	D42－500	D42－630	D42－800	D42－1000
锻模公称直径/mm	160	250	400	500	630	800	1 000
公称压力/kN	125	320	800	1 250	2 000	3 200	4 000
锻辊直径/mm	105	170	260	330	430	540	680
锻辊可用长度/mm	160	250	400	500	630	800	1 000
锻辊转速 Ⅰ挡/$r\cdot min^{-1}$	100	80	60	50	40	30	25
Ⅱ挡/$r\cdot min^{-1}$	—	—	40	32	35	20	—
锻辊中心距调节量/mm	≮8	≮10	≮12	≮14	≮16	≮18	≮20
可锻方坯边长/mm	20	35	60	80	100	125	150

① D42－160 为辊锻机型号与规格，按照我国锻压设备的分类方法，每一种锻压设备都用汉语拼音字母与数字表示，如：

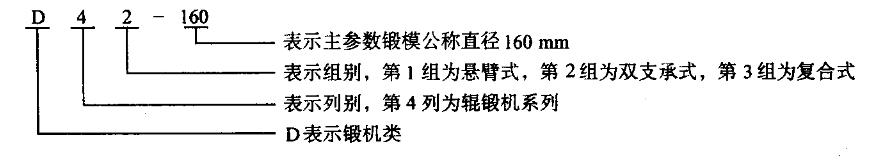


表 5.1-18　悬臂式辊锻机技术参数

参数名称	型号				
	D41－200	D41－250	D41－315	D41－400	D41－500
锻模公称直径/mm	200	250	315	400	500
公称压力/kN	160	250	400	630	1 000

续表 5.1-18

参数名称	型号				
	D41-200	D41-250	D41-315	D41-400	D41-500
锻辊直径/mm	110	140	180	220	280
锻辊转速/r·min^{-1}	125	100	80	63	50
锻辊中心距调节量/mm	10	12	14	16	18
锻辊可用长度/mm	200	250	315	400	500
可锻方坯边长/mm	32	45	63	90	125

表 5.1-19 D43-630 复合式辊锻机技术参数

参数名称		内辊或外辊	数值
锻模公称直径/mm		内、外辊	630
公称压力/kN		内辊	1 600
		外辊	1 000
锻辊转速/r·min^{-1}		内、外辊	40/30
锻辊直径/mm		内辊	400
		外辊	320
锻辊可用宽度/mm		内辊	800
		外辊	320
锻辊中心距调节量/mm		内、外辊	30
		外辊补偿量	±2
可锻方坯边长/mm		内、外辊	80
电动机	型号	JR82-4	
	功率/kW	55	
	转速/r·min^{-1}	1 440	
外形尺寸（长/mm×宽/mm×高/mm）		4 400×2 370×3 200	

4.4 辊锻机的选用

（1）选用辊锻机的基本原则

选用辊锻机主要应考虑所辊锻件的形状、尺寸、生产批量及锻件工艺方案（采用制坯辊锻还是成形辊锻）等因素，并遵循以下一些原则。

1）辊锻机的公称压力和许用辊锻力矩应大于工艺计算所得出的最大辊锻力和力矩，一般应大 20%以上。

2）辊锻模的包角一般不大于 180°，辊锻件的长度应该在辊锻模的工作区域内一次辊锻完成。

3）辊锻机的生产节拍应与锻造生产线中其他设备相适应，满足全线生产节拍的要求。

（2）选用辊锻机的方法

1）按坯料直径选用辊锻机

制坯辊锻时　　$D=(6\sim8)d_0$

成形辊锻时　　$D=(8\sim15)d_0$

式中，D 为辊锻机公称直径；d_0 为坯料直径。

由于成形辊锻所需力能较大，辊锻同样直径坯料时，所用辊锻机规格要比制坯辊锻大得多。

2）按模锻主机吨位选用辊锻机

① 制坯辊锻时，可按表 5.1-20 选用辊锻机。

表 5.1-20 制坯时辊锻机与模锻主机匹配参照表

辊锻机公称直径/mm	370	460	560	680	930，1 000
配用锻锤打击能量/kJ	≤50	50~80	80~125	125~250	≥250
配用锻锤吨位/t	≤2	2~3	3~5	5~10	≥10
配用热模锻压力机公称压力/MN	≤20	20~40	40~50	50~80	≥80
配用螺旋压力机公称压力/MN	≤10	10~16	16~31.5	31.5~50	≥50

② 成形辊锻时，辊锻机的规格主要根据辊锻力和装模空间来选定。由于后续配用的压力机仅起整形或局部成形的作用，所以其吨位要比表 5.1-20 所列数值低得多。例如，同样生产前轴锻件，制坯辊锻时采用 $\phi930$ 辊锻机，配用 120 MN 热模锻压力机。成形辊锻时采用 $\phi1\ 000$ 辊锻机，配用 6 300 kN 摩擦压力机整形。采用精辊-整体模锻复合工艺时，设备配置为 $\phi1\ 000$ 辊锻机精辊制坯和 25 000 kN 摩擦压力机局部模锻成形。

5 辊锻工艺应用实例

5.1 连杆辊锻

目前，常用的连杆辊锻工艺有两种：一是制坯辊锻，主要进行金属体积分配，为后续模锻提供形状合理的毛坯。二是成形辊锻，直接辊锻出锻件的主要轮廓形状，然后经局部整形即可成为成品锻件。

（1）连杆制坯辊锻

以 95 型柴油机连杆锻件为例，其锻件图如图 5.1-59 所示。制坯辊锻工艺设计步骤如下：

1）根据锻件截面图和计算毛坯图设计出辊锻毛坯图（见图 5.1-60）。

2）确定原始毛坯尺寸

$$F_0 = KF_{max} = 1.1\times2\ 878\ \mathrm{mm}^2 = 3\ 165.8\ \mathrm{mm}^2$$

$$d_0 = 1.13\sqrt{F_0} = 63.5\ \mathrm{mm}$$

按钢材标准，选用 $\phi65$ 圆钢

辊锻毛坯体积　$V=\sum V_i = 44\ 391.8\ \mathrm{mm}^3$

辊锻毛坯质量　$G=3.48\ \mathrm{kg}$

原始毛坯长度　$l_0 = \dfrac{V\times1.01\times4}{\pi\times d_0^2} = 135.1\ \mathrm{mm}$

3）确定辊锻道次

总伸长率　$\lambda_z = \dfrac{\pi\times d_0^2}{4\times F_{min}} = \dfrac{\pi\times65^2}{4\times22.8^2} = 6.38$

取平均伸长率　$\lambda_p = 1.6$

辊锻道次　$n = \dfrac{\ln\lambda_z}{\ln\lambda_p} = 3.94$　确定四道次辊锻

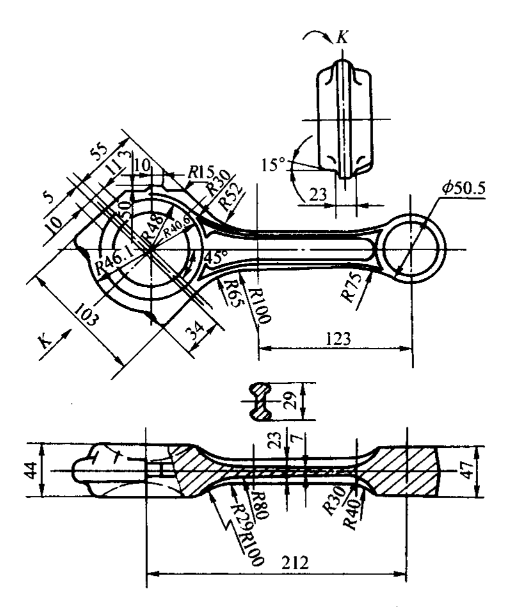


图 5.1-59　95 型连杆锻件图

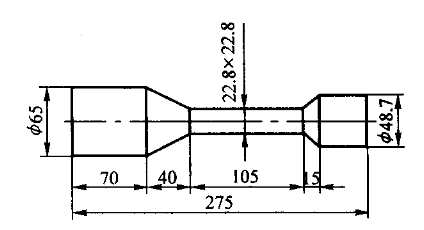


图 5.1-60　95 型连杆辊锻毛坯图

4）杆部型槽系选择及尺寸计算。由于杆部为方形，故选用椭圆－方－椭圆－方型槽系，根据表 5.1-13 选取各道延伸系数：

$$\lambda_1 = 1.97，\lambda_2 = 1.75，\lambda_3 = 1.51，\lambda_4 = 1.32$$

已知 F_0 及各道伸长率为 λ_i，可计算出各道辊锻后的坯料截面积：

$$F_1 = 1\,736.6\ \text{mm}^2，F_2 = 992.4\ \text{mm}^2，$$
$$F_3 = 657.2\ \text{mm}^2，F_4 = 497.9\ \text{mm}^2$$

第一道椭圆型槽尺寸计算。根据表 5.1-13 选取椭圆坯料轴长比 $a_1 = 3.5$，椭圆型槽充满系数 $\delta_1 = 0.9$，根据式（5.1-41）：

$$h_k = \sqrt{\frac{F}{0.756 + 0.623(a/\delta - 1)}}$$
$$= \sqrt{\frac{1\,736.6}{0.756 + 0.623(3.5/0.9 - 1)}} = 26.1\ \text{mm}$$
$$b_k = \frac{a_1 h_k}{\delta_1} = 101.5\ \text{mm}$$
$$R_k = h_k \frac{1 + (a/\delta)^2}{4} = 105.3\ \text{mm}$$

第二道方形型槽尺寸计算。取 $r_2 = 5$，根据式（5.1-46）：

$$c = \sqrt{F + 0.86r^2} = \sqrt{992.4 + 0.86 \times 5^2} = 31.8\ \text{mm}$$
$$b_k = \sqrt{2} \times c = 45\ \text{mm}$$

第三道椭圆型槽和第四道方形型槽尺寸计算方法同前。

5）小头型槽系选择及尺寸计算。由于小头总延伸率较小，且为圆形，故可选用椭圆－圆两道次辊锻，计算方法见前述。

6）型槽纵向尺寸计算。首先，计算出各道坯料各特征段的长度（mm）：

坯料各特征段长度	辊锻道次			
	一	二	三	四
杆部长度 $l_{n-1} = l_n/\lambda_n$	30.6	53.5	80.8	106.6
小头长度 $l'_{n-1} = l'_n/\lambda'_n$	37.2	45.7	45.7	45.7
大头与杆部过渡段长度 l''_{n-1} 按式（5.1-57）计算	27.9	33.9	38	40.6
杆部与小头过渡段长度 l'''_{n-1} 按式（5.1-57）计算	8	11.9	13.9	15.2

然后，计算出各道辊锻模型槽弧长及对应的圆心角：

道次	各特征段长度 $l_{热}$	s	$l_{模} = \frac{l_{热}}{1+s}$	$R_p = \frac{D_0 - h_k}{2}$	$\theta = \frac{57.3 \times l_{模}}{R_p}$/（°）	$\sum\theta$/（°）
第一道	27.9	0.08	25.8	177	8.35	8.35
	30.6	0.03	29.7	187	9.10	17.45
	8	0.02	7.8	183.8	2.43	19.88
	36.3	0.03	35.2	180.7	11.16	31.04 取 45
第二道	33.9	0.08	31.4	172.3	10.44	10.44
	53.5	0.03	52	179.6	16.59	27.03
	11.9	0.02	11.7	176.8	3.79	30.82
	45.7	0.03	44.4	175.7	14.45	45.27 取 55
第三道	38	0.08	35.2	179	11.27	11.27
	80.8	0.03	78.4	191	23.52	34.79
	13.9	0.02	13.6	183.5	4.25	39.04
	45.7	0.03	44.4	175.7	14.45	53.49 取 65
第四道	40.6	0.08	37.6	175.5	12.28	12.28
	106.6	0.03	103.5	186	31.88	44.16
	15.2	0.02	14.9	180	4.74	48.9
	45.7	0.03	44.4	175.7	14.45	63.35 取 75



(2) 连杆成形辊锻

如图5.1-59所示的95型连杆，也可以采用成形辊锻加整形的工艺来生产。该工艺与制坯辊锻后在大吨位设备上模锻工艺相比，设备吨位可降低至1/8～1/10。例如，制坯辊锻后需采用20 000～25 000 kN锻压机模锻，而成形辊锻只需2 500 kN的辊锻机再配以3 000 kN摩擦压力机整形即可，这样就可以大大减少生产线投资，很适合中小企业厂情，但锻件精度比前者略低。

95型连杆成形辊锻的工艺流程为：加热—ϕ630辊锻机三道次辊锻（制坯、预成形、终成形辊锻）—3 000 kN摩擦压力机整形—1 600 kN曲柄压力机切边、冲孔—1 600 kN摩擦压力机热校正。

工艺要点：

1）为了节省夹钳料头，采用顺向辊锻。第一、三道辊锻时坯料大头朝前，而第二道辊锻时坯料小头朝前，其目的是使大小头的前后端在二、三道辊锻时交替处于易成形区，使这两部分均能得到良好成形。

2）连杆大头形状复杂，辊锻充满性能差，因此毛坯直径比制坯辊锻时大，如成形辊锻95型连杆，毛坯需用ϕ80圆钢。

3）由于从第二道到第三道不须翻转90°，第二、三道辊锻允许出飞边，因此成形辊锻时平均延伸系数可取较高值（$\lambda_p=2.5$），辊锻道次也可减少。

95型连杆的终成形、预成形及制坯辊锻模具如图5.1-61～图5.1-63所示。

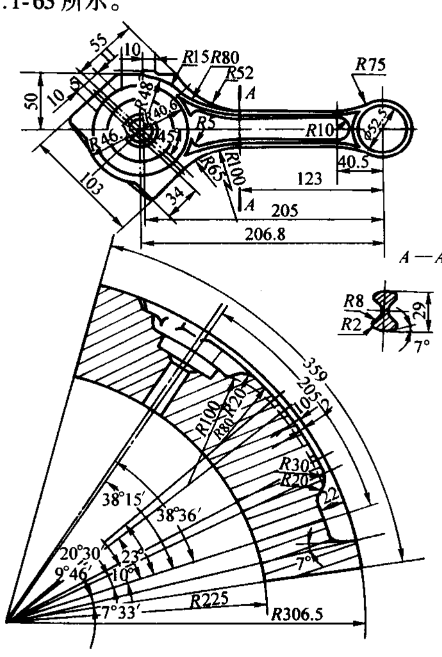


图5.1-61 95型连杆的终成形辊锻模

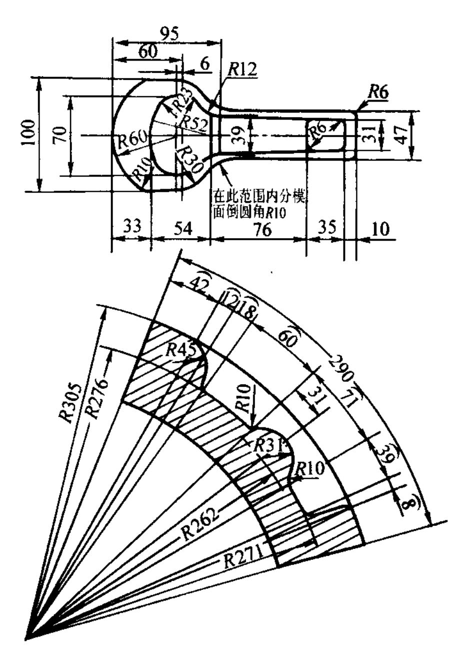
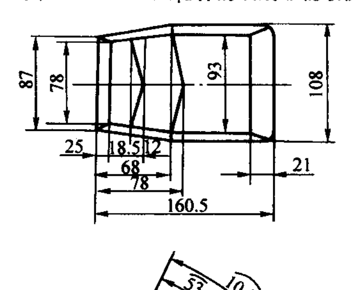


图5.1-62 95型连杆的预成形辊锻模



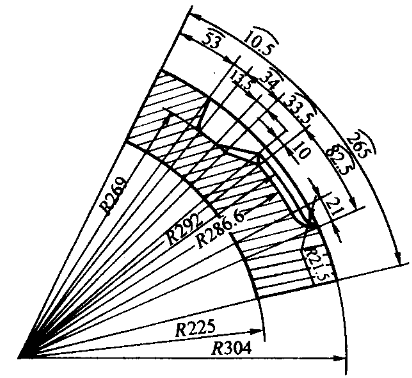


图5.1-63 95型连杆的制坯辊锻模

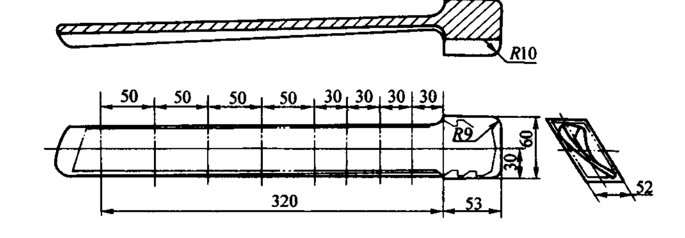


图5.1-64 叶片零件图

5.2 叶片成形辊锻

叶片是汽轮机、燃气轮机、透平压缩机及涡轮增压器等动力机械中的重要零件。以前，叶片常用方钢或锻坯经多次切削加工来生产，其加工周期长，材料利用率只有10%左右，浪费了大量的贵重合金钢。采用辊锻工艺生产叶片，可实现叶身型面的少、无余量加工，材料利用率可达50%以上，特别适合于中、小型叶片的批量生产。

(1) 叶片几何形状与尺寸的特点

叶片形状如图5.1-64所示，一般由叶根和叶身两部分组成。其形状与尺寸具有如下特点。

1）沿长度方向变截面、变弦长、变扭角。

2）同一截面进气边与排气边厚度相差可达5～6倍。

3）锻件叶根截面多为矩形或平行四边形，较易成形。但其截面积比叶身大很多，通常大6～10倍。

4）尺寸精度与表面粗糙度要求高。

因此，在辊锻工艺设计时，要重点解决锻件的侧弯、排



气边的充填及叶根至叶身过渡处的成形等问题。

(2) 叶片辊锻工艺方案

表5.1-21列出国内外叶片成形辊锻工艺采用的几种方案。中小型叶片的生产经验表明，热镦头制坯-辊锻成形工艺由于可减少辊锻道次，减少叶片不均匀变形程度，是值得推广的工艺之一。

表5.1-21　叶片成形辊锻工艺方案

序号	工艺方案	叶片品种	材　料	主要工艺过程	备　注
1	自由锻制坯-辊锻成形	汽轮机动叶片	1Cr13	圆钢下料—空气锤制坯—预成形辊锻(1~2道次)—终成形辊锻—摩擦压力机整形	叶身单边余量1~3 mm
2	高速锤制坯-辊锻成形	汽轮机、压气机动叶片	2Cr13 BT-9	扁钢下料—高速锤挤压叶身坯料—辊锻叶身—整形	叶身单边余量0.25~0.4 mm
3	辊锻制坯-辊锻成形	涡轮增压器叶片	Cr17Ni13W3	下料—制坯辊锻(1~3道)—预成形辊锻—终成形辊锻—整形	无余量或小余量
4	热镦头制坯-辊锻成形	燃气轮机、压气机静叶片	1Cr13	扁钢下料—摩擦压力机热镦头—辊锻叶身—整形	叶身单边余量0.3 mm
5	板料冲压制坯-冷辊成形	燃气轮机、压气机静叶片	Cr17Ni2 GX-8 1Cr17Ni2W2MoV	板料冲压制坯—冷预辊4~8次，每隔2~3道退火一次—冷精辊—热处理—切边—抛光	无余量

(3) 叶片辊锻模具设计要点

1) 辊锻件图的制定。成形辊锻叶片的叶身厚度加工余量可分为无余量、留0.6~1 mm的抛光量和1.5~3 mm的切削加工余量三种，可根据叶片的形状、尺寸及所采用的辊锻工艺分别处理。叶身宽度方向由于可能存在缺陷及充不满等现象，一般单边应加宽2 mm以上。叶根与叶身过渡处圆角半径应尽可能加大，以免各道辊锻发生干涉。为了保证叶根与叶身的相对位置精度，叶根的加工余量应比叶身大一些。

2) 型槽形式的选择。由于叶片进气边和排气边厚度相差很大。辊锻时易造成锻件水平弯曲。因此，叶片预辊及终辊型槽宜选用闭式型槽。而为了减轻型槽侧壁的磨损，制坯型槽常采用开式型槽，在接近预成形的道次也可采用半开式型槽，如图5.1-65所示。

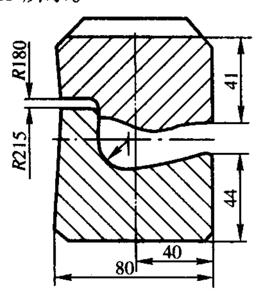


图5.1-65　半开式型槽

3) 压下量的确定。由等厚的毛坯辊锻成进排气边厚度不等的盆形叶身，须经多道次辊锻逐渐成形。这时，虽然无法要求每道次辊锻左右两侧相对压下量都相等，但不均匀变形应分配在制坯或预成形道次，而终成形道次应遵循均匀压下原则，即沿宽度方向上各点压下系数相等(图5.1-66)：

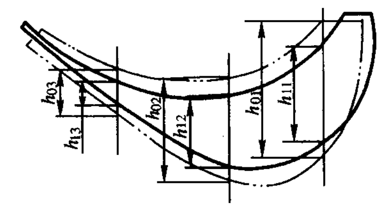


图5.1-66　垂直方向的均匀压下

$$\frac{h_{01}}{h_{11}}=\frac{h_{02}}{h_{12}}=\cdots\cdots=\frac{h_{0n}}{h_{1n}}=c$$

4) 轴向力的平衡。由于叶片有扭角，如按零件图的坐标来布置型槽，势必产生很大的轴向力，导致上下模严重错移。为了最大限度减小轴向力，应将型槽截面绕其重心线旋转一个角度θ，此角称为平衡角，如图5.1-67所示。平衡角θ可按下式估算：

$$\theta=\frac{\alpha_1+\alpha_2+\cdots+\alpha_n}{n} \tag{5.1-65}$$

式中，α_1、α_2、$\cdots\alpha_n$为叶身各截面弦长线对x轴的夹角；n为截面数。

旋转后，型槽轮廓线的各点坐标应按下列公式换算：

$$x_2=x_1\cos\theta+y_1\sin\theta \tag{5.1-66}$$
$$y_2=y_1\cos\theta-x_1\sin\theta$$

式中，x_1、y_1为零件图上型面轮廓线的各点坐标值；x_2、y_2为换算后锻件图及型槽轮廓线的各点坐标值。

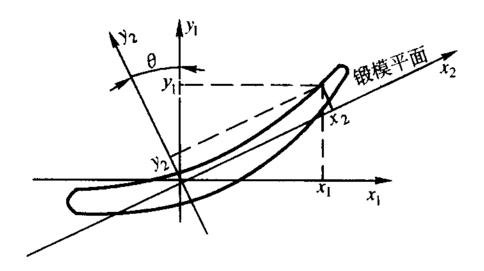


图5.1-67　平衡角及旋转前后坐标

5) 其他工艺参数如辊锻道次、各道延伸率的分配、宽展量、各道型槽宽度、深度、长度等计算或确定可参考本章第三节。

5.3　汽车前轴辊锻

(1) 前轴锻造工艺方案

汽车前轴承受大的交变冲击载荷，其长度长(1 200~2 100 mm)、质量大(33~150 kg)、形状复杂，是工艺难度较大的汽车锻件之一。目前，国内外常用的锻造工艺及其特点如表5.1-22所示。

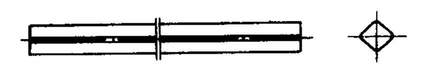


（2）前轴制坯辊锻

采用方形毛坯，在 ϕ930 mm 辊锻机上通过椭圆－方型槽系进行两道次制坯辊锻，使坯料各特征段的体积与锻件相适应，然后在大吨位压力机上进行弯曲、终锻。各道工序成形后坯料形状如图 5.1-68 所示。

表 5.1-22 前轴锻造工艺方案对比

序号	工艺方案／对比项目	锤上模锻	辊锻制坯－锻压机模锻	成形辊锻	精辊－整体模锻复合工艺
1	主要工艺过程	加热—5 t 锤调头锻或自由锻制坯、10～16 t 锤整体弯曲、终锻—12.5 MN 压力机切边—16 MN 摩擦压力机校正	加热—ϕ930 辊锻机制坯—120 MN 锻压机弯曲、预锻、终锻—8 MN 压力机切边—16 MN 油压机校正	加热—ϕ1 000 辊锻机成形—6.3 MN 摩擦压力机调头局部整形—4 MN 摩擦压力机调头切边—10 MN 油压机定长弯曲—16 MN 摩擦压力机整形	加热—ϕ680～1 000 辊锻机精辊—25 MN 摩擦压力机整体弯曲、模锻—12.5 MN 压力机切边—10 MN 摩擦压力机校正
2	设备投资/%	150	1 300	100	160
4	生产率/件·h^{-1}	35	50	25	30
4	锻件质量	加工余量大，斜度大，废品率较高	精度高、质量稳定	可满足使用要求，长度波动大、局部充填不良	精度达到标准，质量较好
5	生产环境	振动噪声大，劳动强度大	自动化操作，劳动条件好	手工操作，劳动条件尚可	可实现机械化，劳动条件较好
6	应用范围	新建项目不提倡应用	少品种大批量生产	多品种中等批量生产	多品种中大批量生产



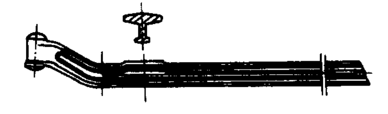
(a) 原始毛坯



(b) 第一道辊锻后



(c) 第二道辊锻后



(d) 经弯曲、预锻、终锻、切边、校正后的前轴锻件

图 5.1-68 前轴制坯辊锻

（3）前轴成形辊锻

1）辊锻模具设计要点

① 由于前轴沿长度方向截面积相差很大，形状复杂，故选择制坯、预成形、终成形三道次辊锻。

② 钢板弹簧座截面为非对称工字形，一侧具有薄而长的“腿”（图 5.1-68d 中截面），因此在制坯时，该处设计了“礼帽”形型槽，以便坯料翻转 90°进入下两道型槽时，利于充满，减少不均匀变形。

③ 为了解决锻件的长度波动，应严格控制始锻温度，并选取合适的前滑值。

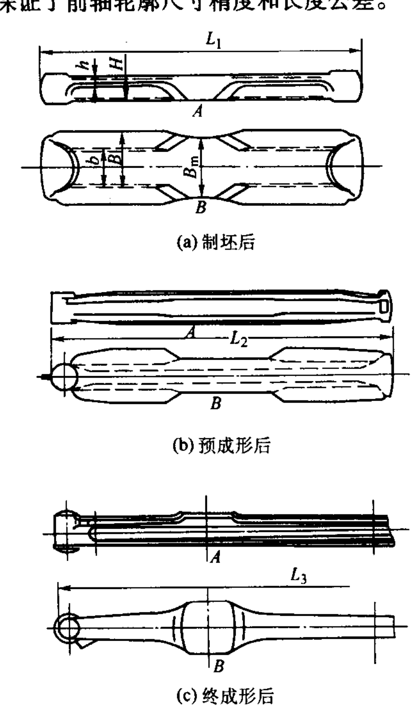
④ 为了解决两端“拳头”的良好成形，在预成形时，其后端易成形区成形一个“拳头”，然后调头进入终成形型槽，使另一个“拳头”同样处于后端易成形区。

⑤ 为了保证各道坯料平直，需设计制造强有力的进出料导向装置。

2）原始毛坯采用圆钢，各道辊锻坯料形状如图 5.1-69 所示。

（4）前轴精辊－整体模锻复合工艺

1）工艺设计思路。对前轴中部工字筋部位和两侧的弹簧座部位采用精辊工艺成形到最终形状和尺寸，而两端的“拳头”和颈部过渡区辊锻只起制坯作用，在后续的整体弯曲、模锻时最终成形。这样，可使整体模锻力减小 50%～70%，并保证了前轴轮廓尺寸精度和长度公差。



(a) 制坯后

(b) 预成形后

(c) 终成形后

图 5.1-69 前轴成形辊锻各道坯料形状

2）辊锻模具设计要点。原始毛坯采用圆钢，经四道次辊锻。第一道将毛坯中部和弹簧座部位压扁，使工字筋和弹簧座材料分开。第二道将坯料翻转 90°，主要成形弹簧座并延伸工字筋。第三道主要成形工字筋，并让开弹簧座，避免刮伤。第四道将工字筋伸长至所需尺寸。各道辊锻毛坯如图



5.1-70 所示。

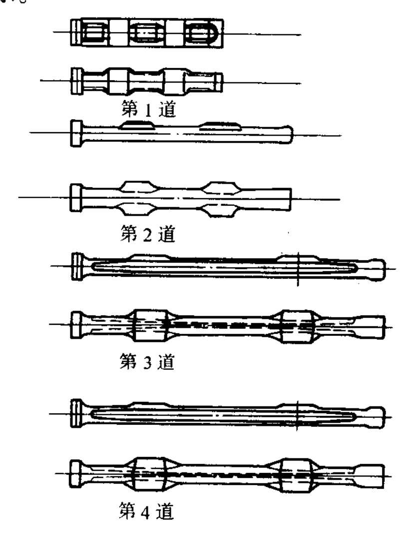


图 5.1-70　前轴精辊各道辊锻毛坯简图

5.4　汽车变截面板簧片精密辊锻

少片变截面板簧是汽车悬架系统中多片叠板弹簧的更新换代产品。二者相比，前者具有质量轻、节材节能、疲劳寿命高、车辆平顺性与舒适性好、制造成本低等优点。单片变截面板簧片如图 5.1-71 所示。产品的要求为：①多数产品为中间厚、向两端逐渐减薄而宽度不变。②由于其刚度与厚度立方成正比，故要求厚度尺寸精确。③两侧面保持圆弧面，表面光洁，以便减少应力集中和消除疲劳裂源。④沿长度方向的侧弯应小于 3 mm/m，以便保证装配质量，省略辊锻后校直工序。

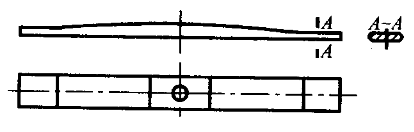


图 5.1-71　变截面板簧片

(1) 工艺设计思路

为了确保上述的产品要求，精密辊锻工艺设计时采用三道次辊锻工艺方案，即立辊、预辊、精辊。立辊的目的是将板片沿宽度方向辊锻成楔形。然后在厚度方向，在预辊型槽中完成大部分变形，而精辊型槽则是利用小变形精整原理达到精整之目的。这样，可长时间保持精辊模具的精度，延长其使用寿命。

(2) 辊锻模具设计要点

1) 为了保持板簧片等宽、有效控制侧弯及保持两侧圆弧上下对称，预辊和精辊模具采用由凸凹模组成的闭式型槽，如图 5.1-72 所示。预辊时上模工作表面为等半径凹模，下模工作表面为变半径凸模，精辊则相反。

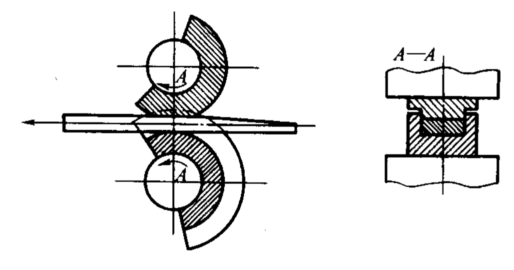


图 5.1-72　变截面板簧片精辊模具

2) 如何准确计算板片在闭式型槽内的宽展量，使精辊后板片既保证充满又不出现纵向毛刺，确保宽度公差控制在 ±0.5 mm 范围内，是工艺计算的关键之一。根据大量试验，认为板片在闭式型槽内的宽展系数 β 按下列公式计算具有足够准确度：

$$\beta=\frac{B_1}{B_0}=0.998\,995\,6-0.513\,358\,8\varepsilon-0.111\,097\,7\varepsilon\frac{B_0}{H_0}+6.788\,466\times10^{-3}\varepsilon\left(\frac{B_0}{H_0}\right)^2 \tag{5.1-67}$$

式中，$\varepsilon=\frac{H_0-H_1}{H_0}$；$H_0$、$B_0$ 为毛坯原始厚度和宽度；H_1、B_1 为辊锻后工件的厚度和宽度。

上式适用范围：$\varepsilon=10\%\sim50\%$，$B_0/H_0=4\sim7$，锻模公称直径 $D=400$ mm，摩擦因数 $\mu=0.3$。

编写：黄良驹（吉林大学）



第2章 楔 横 轧

1 概述

1.1 工作原理

楔横轧的工作原理如图 5.2-1 所示，两个带楔形模具的轧辊，以相同的方向旋转并带动圆形轧件旋转，轧件在楔形孔型的作用下，轧制成各种形状的台阶轴。楔横轧的变形主要是径向压缩轴向延伸。

楔横轧广泛应用于汽车、拖拉机、摩托车、内燃机等轴类零件毛坯的生产。还可以用它为模锻件提供比其他锻造方法更精确的预制毛坯，例如发动机连杆、五金工具等。我国楔横轧的部分零件如图 5.2-2 所示。

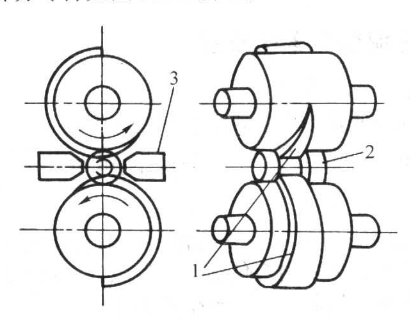


图 5.2-1 楔横轧原理图
1—带楔形模具的轧辊；2—轧件；3—导板

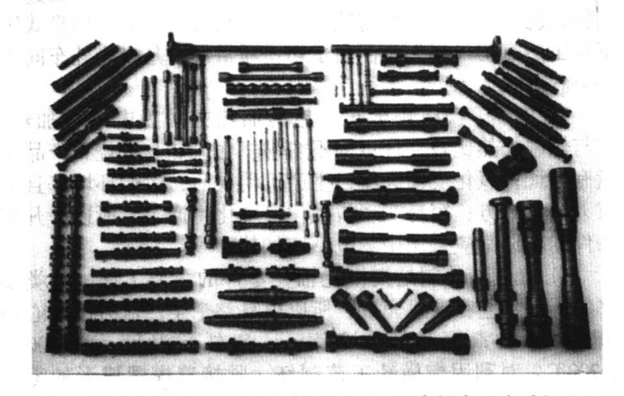


图 5.2-2 我国楔横轧汽车、拖拉机、摩托车、发动机、五金工具等轴类零件

1.2 工艺特点

楔横轧是一种高效金属成形工艺。它是冶金轧制技术的发展，因为它将轧制等截面的型材，发展到轧制变截面的轴类零件；它又是机械锻压技术的发展，因为它将整体继续塑性成形，发展到局部连续塑性成形。楔横轧是工件在回转运动中成形的，所以又称它为回转成形，也有称它为特殊锻造的。由于成形的零件都是回转体轴类零件，故又统称它为轴类零件轧制。

轧制零件与锻造零件在成形方式上不同，前者与后者比较，具有如下突出优点。

1）工作载荷小。由于是连续局部成形，工作载荷很小，只有一般模锻的几分之一到几十分之一。

2）设备重量轻。由于工作载荷小，所以设备重量轻，体积小，投资省。

3）生产率高。一般高几倍到几十倍。

4）产品精度高。产品尺寸精度高，表面粗糙度小，具有显著的节材效果。

5）工作环境好。冲击与噪声都很小，工作环境显著改善。

6）易于实现机械化自动化生产等。

将零件轧制中的楔横轧与零件锻造中模锻生产东风 EQ140 变速箱中的中间轴为例进行比较，如表 5.2-1 所示。

1.3 国内外发展与应用简况

人们很早就探讨用楔横轧方法成形轴类零件，由于技术上的原因，一直未能应用于生产。直到 20 世纪 60 年代初，原捷克斯洛伐克首先将辊式楔横轧技术应用于工业生产，生产汽车轴类件以及五金工具坯等。它在莱比锡国际博览会上展出，得到人们的广泛重视，从而成为世界上众所周知的轴类零件成形的新工艺和新技术。60 年代后期，原民主德国将板式楔横轧机也研究成功并投入生产。这项技术在前苏联也得到较广泛的应用，除有辊式、板式楔横轧机外，还有单辊弧形式楔横轧机。生产的产品有汽车、拖拉机、电机以及煤炭机械上的轴类零件。日本也将楔横轧技术用于生产汽车轴类零件。

20 世纪 60 ~ 70 年代，重庆大学、原东北工学院、清华大学等，在我国最早进行楔横轧的实验研究工作，并都取得不同程度的科研与实验成果，但由于种种原因也都未能应用于工业生产。

表 5.2-1 楔横轧与模锻生产汽车中间轴的比较

生产工艺	公称压力 /kN	设备质量 /t	生产率 /件·min^{-1}	材料利用率 /%	模具寿命 /万件	工作噪声 /dB
楔横轧	600	58	6 ~ 8	85	> 8	< 60
模锻	40 000	285	2 ~ 3	70	< 1	> 100

上海锻压机床三厂研制成功单辊弧形式楔横轧鲤鱼钳毛坯新工艺，是我国最早将楔横轧应用于生产的单位，并收到较好的经济效果。由于单辊弧形式楔横轧在模具制造、工艺调整等方面都十分困难，故一直不能得到推广。

20 世纪 80 年代以后，济南铸锻研究所、郑州机械所、北京机电研究所、吉林工业大学，先后开展了楔横轧的研究与开发工作，也都取得不同的进展。

20 世纪 70 年代以来，北京科技大学轴类零件轧制研究室开展了楔横轧技术的研究与开发工作，将楔横轧机系列化，轧制产品的直径从 $\phi6 \sim \phi125$ mm，长度由 30 ~ 1 100 mm。近十年来，在我国成功的推广楔横轧生产线 80 多余，开发并应用于生产的零件品种达 200 多种，使我国成为世界上用楔横轧工艺生产产品最多的国家之一。图 5.2-3 所示为楔横轧汽车轴类零件，图 5.2-4 为楔横轧拖拉机轴类零件，

图 5.2-5 为楔横轧发动机凸轮轴零件，图 5.2-6 为楔横轧摩托车自行车轴类零件，图 5.2-7 为楔横轧五金工具毛坯。

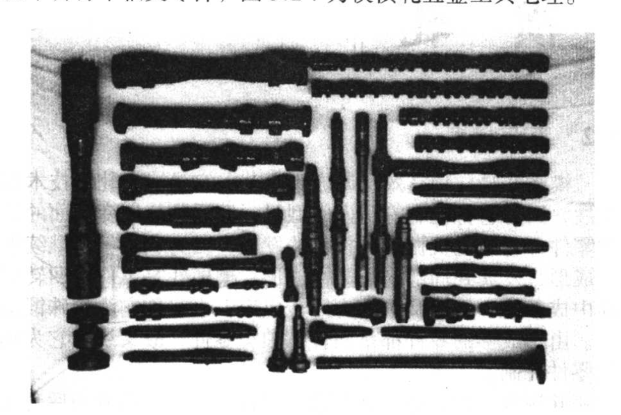


图 5.2-3　楔横轧汽车轴类零件

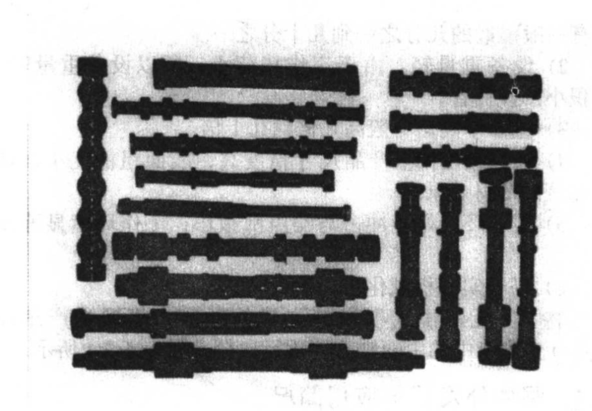


图 5.2-4　楔横轧拖拉机轴类零件

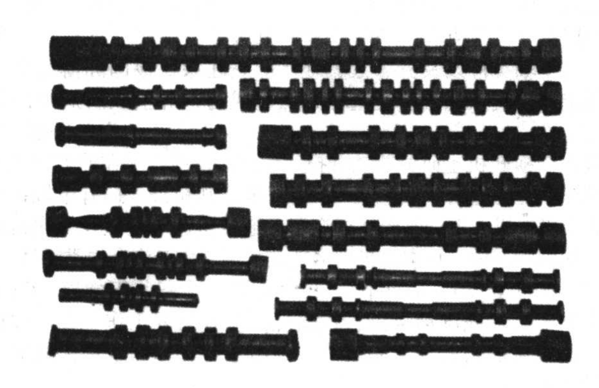


图 5.2-5　楔横轧发动机凸轮轴零件

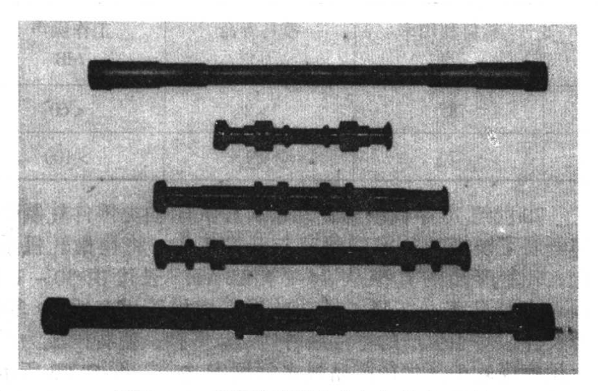


图 5.2-6　楔横轧摩托车自行车轴类零件

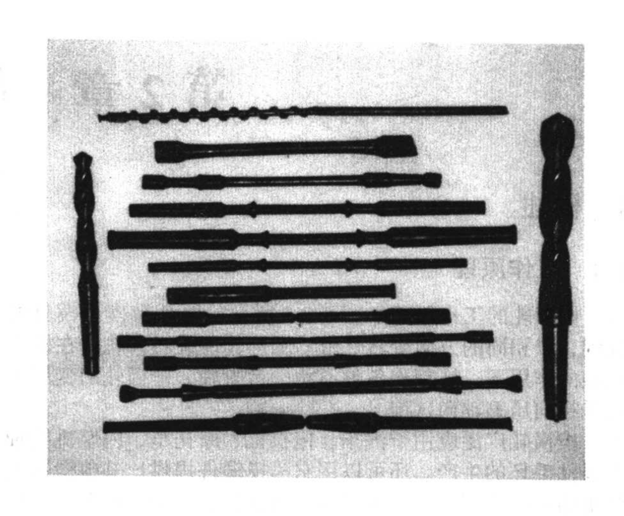


图 5.2-7　楔横轧五金工具毛坯

1.4　工艺流程与车间布置

（1）生产工艺流程

楔横轧专业化工厂主要工艺流程如下：

[长棒料] → [定尺下料] → [加热] → [轧制] → [空冷] → [正火] → [抛丸] → [矫直] → [检验]

1）长棒料。从冶金厂来的棒料一般长度为 4～6 m，到厂后应经检验，主要内容包括：化学成分、直径公差及圆度检验，表面有无缺陷，中心疏松级别等。

2）定尺下料。按照零件毛坯体积（加烧损）加上料头损失为下料体积进行定尺下料。用剪断机下料的优点是生产率高，在断口处无材料损失，缺点是剪口有马蹄形。故这种下料只能用于产品两头需轧细并去掉料头的产品。用带式锯下料虽然有切口损失，但由于切口质量好，是楔横轧车间主要下料方式。

3）加热。楔横轧车间理想的加热方法为电感应加热。它与燃料加热比较，优点为不容易发生过热与过烧，产品质量有保证；氧化皮损失小；生产机动灵活；生产环境好且节省人力和地方；容易实现机械化自动化生产等。所以，凡有条件的工厂都应采用中频电感应加热。

4）轧制。轧制是楔横轧轴类零件的主要工序。轴类零件的成形工艺在这里完成，所以也是整个生产流程的中心环节。对于碳素钢和低合金钢，一般轧制温度为 1 000～1 200℃。对利用楔横轧工艺制坯，紧接着模锻成形的零件（如生产发动机连杆），一般取较高的温度轧制，没有特殊要求的取较低的温度轧制。轧机的生产率一般为每分钟 6～12 件（或对）。

5）空冷。多数轧件采用轧后空冷。空冷经检验后就可以向用户交货也有需要正火状态交货的，大多采用空冷后，再加热经正火后交货的，但也有采用轧后余热正火的。

6）正火。一般采用台车式电阻正火炉进行轴类零件毛坯的正火处理。正火的主要目的是得到符合切削加工的硬度（一般 190～220HB）；符合晶粒度等内部组织的要求以及消除零件的内应力等。

7）抛丸清理。轴类零件毛坯多采用抛丸清理。其主要目的一是清除轧制、正火后轧件表面形成的氧化皮及其他缺陷（皱纹、毛刺等），减少在切削加工中刀具的磨损；二是显露轧件表面缺陷，为检查轧件质量提供条件。

8）矫直。对于楔横轧轴类件，尤其是细长的轴类件，在加热、轧制、冷却以及正火处理中，免不了有弯曲变形，所以通常需要矫正工序。一般做法是，在小型压力机的工作



台上垫上V形铁，靠人工操作将冷下的轧件矫直。

9）检验。轧件质量检验的目的在于保证产品质量符合锻件的技术标准。其检验的内容包括：尺寸与几何形状、表面质量、内部质量、力学性能与化学成分等。

（2）典型车间布置

专业化楔横轧轴类零件工厂的典型车间布置，如图5.2-8所示。专业化楔横轧工厂，在车间布置上应注意的问题如下：

1）专业化楔横轧厂是为社会提供各种轴类零件毛坯的，因此一般应有两种规格以上的轧机，例如H1000、H630两台，或者H1000、H800两台，或者H1000、H800、H630三台。这样的组成，适应性较广，比较经济。

2）从原材料进厂到轧件出厂，包括中间各个环节，应尽可能按顺序布置。

3）原料工区、轧制工区与精整工区既可以建在同一跨间内共用吊车，如图5.2-8所示，也可以将原料工区放在附跨里。精整工区可以另设独立车间。

4）中频电源与中频炉，应尽可能靠近布置。

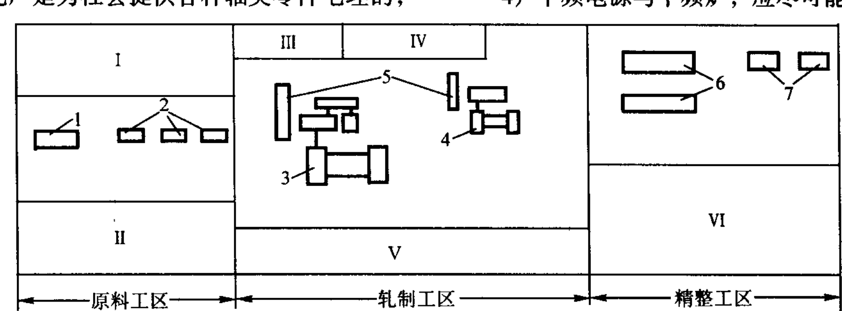


图5.2-8　楔横轧专业化厂的典型车间

1—剪断机；2—带式锯；3—H1000楔横轧机；4—H630楔横轧机；5—中频加热炉；6—台车式正火炉；7—抛丸机

Ⅰ—长棒料场；Ⅱ—定尺料场；Ⅲ—主电室；Ⅳ—中频电源室；Ⅴ—模具存放场；Ⅵ—轧件存放场

2　轧制理论

2.1　运动原理

本节主要阐述楔横轧轧制时，轧辊与轧件间的运动关系。这对于认识轧件在轧辊上如何相对运动，零件是怎样成形的，轧辊根据什么调整，轧辊磨损的原因以及轧件发生扭转变形缺陷等都有直接关系。

（1）轧辊与轧件的圆周速度

图5.2-9为典型楔横轧轧制的两个视图。轧辊以逆时针主动旋转，带动轧件顺时针旋转。

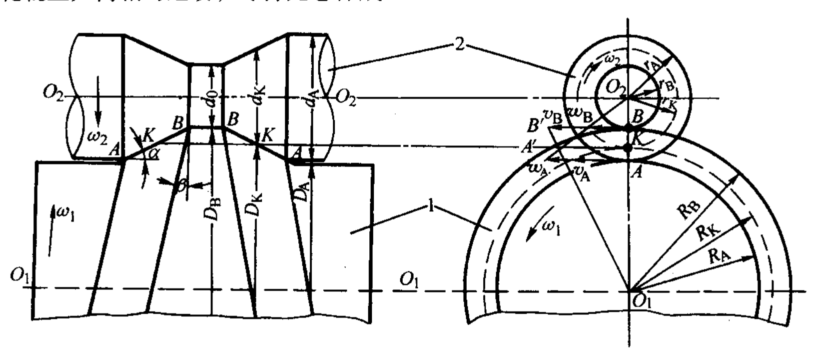


图5.2-9　典型楔横轧轧制主侧视图

1—轧辊；2—轧件

轧辊上任意一点的圆周速度 v 为

$$v=\omega_1 R=\frac{\pi D n_1}{60} \qquad (5.2\text{-}1)$$

式中，ω_1、n_1 分别为轧辊的角速度与转速；R、D 分别为轧辊上任意一点的半径与直径。

轧辊的圆周速度，如图5.2-9所示，呈三角形 $O_1B'B$ 分布。

轧辊表面圆周速度最大值在 B 处（楔顶处），其速度 v_B 为

$$v_B=\omega_1 R_B=\frac{\pi D_B n_1}{60} \qquad (5.2\text{-}2)$$

式中，R_B、D_B 分别为轧辊楔顶（B 处）的半径与直径。

轧辊表面圆周速度最小值在 A 处（指与轧件接触表面中），其速度 v_A 为

$$v_A=\omega_1 R_A=\frac{\pi D_A n_1}{60} \qquad (5.2\text{-}3)$$

式中，R_A、D_A 分别为轧辊与轧件接触表面中最小半径与直径。

将轧件视为绝对刚体，当正常稳定轧制时，轧件上任一点的圆周速度 w 为

$$w=\omega_2 r=\frac{\pi d n_2}{60} \qquad (5.2\text{-}4)$$

式中，ω_2、n_2 分别为轧件的角速度与转速；r、d 分别为轧件上任意一点的半径与直径。

轧件的圆周速度，如图5.2-9所示，呈三角形 $O_2A'A$ 分布。

轧件表面圆周速度最大值在 A 处，其速度 w_A 为

$$w_A=\omega_2 r_A=\frac{\pi d_A n_2}{60} \qquad (5.2\text{-}5)$$

式中，r_A、d_A 分别为轧件表面最大半径与直径（即轧件的外径）。

轧件表面圆周速度最小值在 B 处（指与轧辊接触表面中），其速度 w_B 为

$$w_B = \omega_2 r_B = \frac{\pi d_B n_2}{60} \tag{5.2-6}$$

式中，r_B、d_B 分别为轧件与轧辊楔顶面接触表面的半径与直径。

(2) 轧辊与轧件间的相对滑动

当正常稳定轧制时，并将轧件视为绝对刚体时，轧辊与轧件间的相对运动如下（图 5.2-9）。

1) 在 K 处，轧辊与轧件的圆周速度是相等的。在 K 处轧辊与轧件作无相对滑动的滚动，即

$$v_K = \omega_1 k_K = \omega_2 r_K = w_K \tag{5.2-7}$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_K}{R_K} = \frac{n_1}{n_2}$$

得到

$$n_2 = \frac{R_K}{r_K} n_1 \tag{5.2-8}$$

式中，v_K、w_K 分别为轧辊与轧件在 K 处的圆周速度；R_K、r_K 分别称为轧辊与轧件的轧制半径。

K 点位置应根据轧件自身力矩平衡条件来确定，即作用于轧件上的力矩之和为零（$\sum M=0$）求得。但由于孔型形状、压力分布、摩擦因数等十分复杂，很难用解析式求得，可以用实测轧辊转速 n_1 与轧件转速 n_2 的方法求得。

2) 在 KB 段，轧辊的圆周速度 v 均大于轧件的圆周速度 w，之间产生相对滑动。圆周速度差最大在 B 处，其速度差（即相对滑动速度）Δv_B 为

$$\begin{aligned}\Delta v_B &= v_B - w_B = \omega_1 R_B - \omega_2 r_B \\ &= \frac{\pi}{30}(R_B n_1 - r_B n_2) = \frac{\pi n_1}{30}\left(R_B - r_B \frac{R_K}{r_K}\right)\end{aligned} \tag{5.2-9}$$

式中，v_B、w_B 分别为轧辊与轧件在 B 处的速度。

由于 B 处压力大，相对滑动也很大，所以在轧辊 B 处附近是最容易磨损的。

3) 在 KA 段，轧辊的圆周速度 v 均小于轧件的圆周速度 w，之间产生相对滑动。圆周速度差最大在 A 处，其速度差（即相对滑动速度）Δv_A 为

$$\begin{aligned}\Delta v_A &= w_A - v_A = \omega_2 r_A - \omega_1 R_A \\ &= \frac{\pi}{30}(r_A n_2 - R_A n_1) \\ &= \frac{\pi n_1}{30}\left(r_A \frac{R_K}{r_K} - R_A\right)\end{aligned} \tag{5.2-10}$$

式中，w_A、v_A 分别为轧件与轧辊在 A 处的速度。

尽管 A 处的相对滑动较大，但此处的压力并不大，所以在 A 处附近的磨损不如 B 处附近严重。

2.2 轧件旋转条件

上面分析的是已经实现稳定轧制时的运动学问题。本节要分析的是，具备什么样的条件轧辊才能带动轧件正常旋转，即所谓轧件的旋转条件。

(1) 横轧的旋转条件

楔横轧与斜轧的旋转条件都是建立在简单横轧旋转条件基础上的，所以先讨论简单横轧的旋转条件。所谓简单横轧是指忽略导板、导管等作用在轧件上的外力，忽略轧件的自重与惯性力，且轧制线与轧机中心一致。

当垂直于轧制轴线剖开时，轧制情况如图 5.2-10 所示，轧辊给轧件作用四个外力，两个 P 力与两个 T 力，它们对称作用于轧件。P 为正压力，它的方向一边通过轧辊中心 O_1，另一边通过接触弧 AB 的中间位置（近似值），即 P 力的方向与 O_1O_2 夹角为旋转角 φ 的一半；T 为轧辊给轧件的摩擦力，它与 P 力垂直，其大小与正压力 P 成正比，即

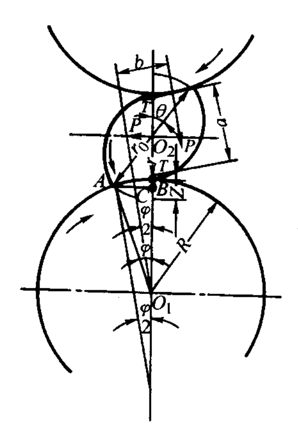


图 5.2-10 简单横轧受力图

$$T = \mu P \tag{5.2-11}$$

式中，μ 为轧辊与轧件间的摩擦因数。

轧件能够旋转起来的条件应该是 T 组成的力偶矩 M_T 大于或等于 P 组成的力偶矩 M_P，即

$$M_T \geqslant M_P \tag{5.2-12}$$

或

$$Ta \geqslant Pb \tag{5.2-13}$$

式中，a 为两个 T 之间的垂直距离；b 为两个 P 之间的垂直距离。

将式（5.2-13）代入式（5.2-11）化简后得

$$\mu \geqslant \frac{b}{a} \tag{5.2-14}$$

而

$$b = 2(R+r)\sin\frac{\varphi}{2} \tag{5.2-15}$$

$$a = 2(r-C)\cos\frac{\varphi}{2} \tag{5.2-16}$$

式中，r 为轧件出口半径（见图 5.2-10）；C 为 B 点至 T 与 $\overline{O_1O_2}$ 线交点间的距离。

将式（5.2-15）、(5.2-16) 代入式（5.2-14）后得

$$\mu \geqslant \frac{2(R+r)\sin\frac{\varphi}{2}}{2(r-C)\cos\frac{\varphi}{2}} = \frac{R+r}{r-C}\tan\frac{\varphi}{2} \tag{5.2-17}$$

式中 $$C = \frac{R}{\cos\frac{\varphi}{2}} - R = R\left[\frac{1-\cos\frac{\varphi}{2}}{\cos\frac{\varphi}{2}}\right]$$

将上式代入式（5.2-17）后得

$$\mu \geqslant \frac{R+r}{r - R\left[\dfrac{1-\cos\frac{\varphi}{2}}{\cos\frac{\varphi}{2}}\right]}\tan\frac{\varphi}{2} \tag{5.2-18}$$

横轧由于 φ 角很小，C 值可以省略，旋转条件的公式简化为

$$\mu \geqslant \frac{R+r}{r}\tan\frac{\varphi}{2} = \left(1+\frac{R}{r}\right)\tan\frac{\varphi}{2} \tag{5.2-19}$$

用式（5.2-19）分析旋转条件仍不够直接，希望把 $\tan\frac{\varphi}{2}$ 改写成比较直观的几何参数，为此需作进一步地推导。

从图 5.2-10 可以看出，当 φ 角较小时，可以近似认为

$$\tan\frac{\varphi}{2} = \sin\frac{\varphi}{2} \tag{5.2-20}$$

而

$$\sin\frac{\varphi}{2} = \sqrt{\frac{1-\cos\varphi}{2}} \tag{5.2-21}$$



从图 5.2-10 中△O_1AC 与△O_2AC 可以得到

$$\overline{AC} = R\sin\varphi = r_0\sin\varphi$$

式中，r_0 为轧件入口的半径（见图 5.2-10）。

$$\sin\theta = \frac{R}{r_0}\sin\varphi \tag{5.2-22}$$

而

$$\overline{O_1O_2} = R + r_0 - Z = R\cos\varphi + r_0\cos\theta \tag{5.2-23}$$

式中，Z 为压缩量（见图 5.2-10）。

$$Z = r_0 - r$$

因为

$$\cos\theta = \sqrt{1-\sin^2\theta}$$

将式（5.2-22）代入上式后得

$$\cos\theta = \sqrt{1-\frac{R^2}{r_0^2}\sin^2\varphi}$$

再将上式代入式（5.2-23）得

$$R + r_0 - Z = R\cos\varphi + r_0\sqrt{1-\frac{R^2}{r_0^2}\sin^2\varphi}$$

或
$$R(1-\cos\varphi) + (r_0 - Z) = r_0\sqrt{1-\frac{R^2}{r_0^2}\sin^2\varphi}$$

将上式两边平方再经整理后得

$$R^2[(1-\cos\varphi)^2 + \sin^2\varphi] + 2(1-\cos\varphi)(Rr_0 - RZ) + Z^2 - 2r_0Z = 0$$

因为
$$(1-\cos\varphi)^2 + \sin^2\varphi = 2(1-\cos\varphi)$$

所以

$$2R^2(1-\cos\varphi) + 2(1-\cos\varphi)(Rr_0 - RZ) + Z^2 - 2r_0Z = 0$$

$$\cos\varphi = 1 - \frac{Z(2r_0 - Z)}{2R^2 + 2R(r_0 - Z)} = 1 - \frac{2(d_0Z - Z^2)}{D(D + d_0 - Z)}$$

$$= 1 - \frac{2(dZ + Z^2)}{D(D+d)} \tag{5.2-24}$$

将式（5.2-24）代入式（5.2-20）、式(5.2-21）得

$$\tan\frac{\varphi}{2} = \sqrt{\frac{1-\left[1-\frac{2(dZ+Z^2)}{D(D+d)}\right]}{2}} = \sqrt{\frac{dZ+Z^2}{D(D+d)}} \tag{5.2-25}$$

将式（5.2-25）代入式（5.2-19）得

$$\mu \geqslant \frac{R+r}{r}\sqrt{\frac{dZ+Z^2}{D(D+d)}} = \frac{D+d}{d}\sqrt{\frac{dZ+Z^2}{D(D+d)}}$$

两边平方再经整理后得

$$\mu^2 \geqslant \left(1+\frac{d}{D}\right)\left[\frac{Z}{d} + \left(\frac{Z}{d}\right)^2\right]$$

Z/d 称为相对压缩量。Z/d 值较小，$(Z/d)^2$ 值更小可以忽略不计，这样可得到更为明确的旋转条件关系式，即

$$\mu^2 \geqslant \left(1+\frac{d}{D}\right)\frac{Z}{d} \tag{5.2-26}$$

或

$$\frac{Z}{d} \leqslant \frac{\mu^2}{1+\frac{d}{D}} \tag{5.2-27}$$

式（5.2-27）就是简化了的简单横轧旋转条件关系式。

把不等式（5.2-27）写成等式，则压缩量 Z 需改换成极限压缩量 Z'，得

$$\frac{Z'}{d} = \frac{\mu^2}{1+\frac{d}{D}} \tag{5.2-28}$$

把相对极限压缩量 $\frac{Z'}{d}$、摩擦因数 μ 及轧辊与轧件直径比 D/d 作为参量，按式（5.2-28）可以作出曲线图 5.2-11。

从式（5.2-28）与图 5.2-11 可以看出以下几点。

1) 摩擦因数 μ 对旋转条件影响显著，所以在楔横轧中，为了强化旋转条件，需在楔子的侧面刻平行于轴线的条纹。在某些新产品试轧时，为防止不旋转，常采用撒沙子或者加其他摩擦剂的办法来增加 μ 值。

2) 轧辊直径与轧件直径之比 D/d 对旋转条件的影响是比值越大，旋转条件越好。当 $D/d<5\sim6$ 时，影响显著；当 $D/d>5\sim6$ 时，影响甚微；当 D/d 从 5 增加到 10 时，Z'/d 只增加 9%左右；当 D/d 从 5 增加到 20 时，Z'/d 只增加 14%左右。所以，从旋转条件的观点选择轧辊直径时，一般取 D/d 等于 4～6 就可以了。

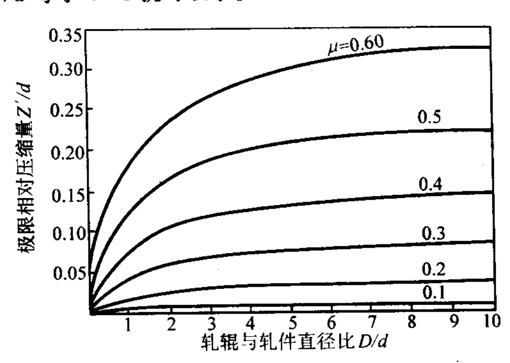


图 5.2-11 摩擦因数、轧辊和轧件直径比与极限相对压缩量的关系曲线图

3) 相对压缩量 Z/d 越大，旋转条件越差。在孔型设计中需用极限压下量来设计校核，也就是说用它来确定或校核轧辊凸棱高度变化曲线。

(2) 楔横轧的旋转条件

楔横轧的旋转条件是建立在简单横轧基础上的，即可以运用公式（5.2-26）或式（5.2-27）来计算或校核楔横轧能否旋转的问题。

运用式（5.2-26）和式（5.2-27）时，主要问题是如何确定楔横轧的 Z 值，只要把 Z 值确定下来，楔横轧的旋转条件就解决了。

为此，我们作一个典型楔横轧展开图，表示在图 5.2-12 上。图中 β 为轧辊的展宽角，α 为轧辊的成形角，d_0 为轧件

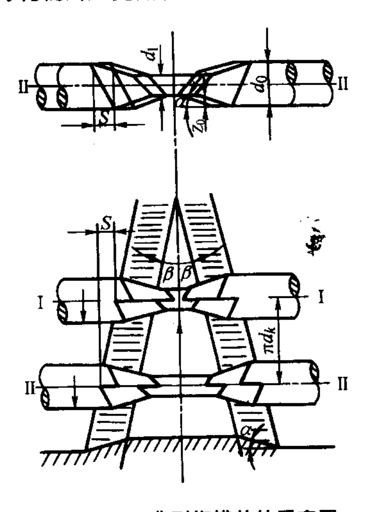


图 5.2-12 典型楔横轧的展宽图



未轧前的直径，d_1 为轧件轧后直径。

满足楔横轧的旋转条件是指从Ⅰ－Ⅰ位置轧制到Ⅱ－Ⅱ位置中轧件无整体打滑，即轧件以轧制直径 d_K 作无滑动的滚动（故 d_K 又称作轧件的滚动直径）。

设 m 为轧辊个数，那么轧件转动 $1/m$ 圈时所走的展开长度 L 应该是

$$L=\frac{1}{m}\pi d_K \tag{5.2-29}$$

此时，轧件的瞬时宽展量 S（简称宽展量）为

$$S=\frac{1}{m}\pi d_K\tan\beta \tag{5.2-30}$$

假想的瞬时宽展面积 F 为

$$F=S\Delta r=\frac{1}{2m}\pi d_K(d_0-d_1)\tan\beta \tag{5.2-31}$$

式中，Δr 为总压缩量。

$$\Delta r=\frac{d_0-d_1}{2}$$

F 相当于车削时的切屑面积，它是影响轧制压力与扭矩的主要因素之一。但是此面积 F 在轧制中并不存在，其真实面积可用轧制时的三面投影表示，如图 5.2-13 所示。

真实的轧辊与轧件的接触面积在图 5.2-13 的主视图中为 $ACDB$，在俯视图中为 $A'ABDC$，在侧视图中 $A'CDBB'A$。

从图 5.2-13 可以看出，沿轧件轴线方向 CD 区内的压缩量 Z 最大，其值保持不变，均为

$$Z_0=S\tan\alpha \tag{5.2-32}$$

将式（5.2-30）代入式（5.2-32）得

$$Z_0=\frac{1}{m}\pi d_K\tan\alpha\tan\beta \tag{5.2-33}$$

将式（5.2-33）代入式（5.2-27），便得到楔横轧中 CD 区的旋转条件式

为

$$\frac{\pi d_K\tan\alpha\tan\beta}{md}\leqslant\frac{\mu^2}{1+\frac{d}{D}}$$

或

$$\tan\alpha\tan\beta\leqslant\frac{md\mu^2}{\pi d_K\left(1+\frac{d}{D}\right)} \tag{5.2-34}$$

在 $A'C$ 区内，压缩量 Z 是变化的，A 点最小 $Z=0$，C 点最大为

$$Z_0=\frac{1}{m}\pi d_K\tan\alpha\tan\beta$$

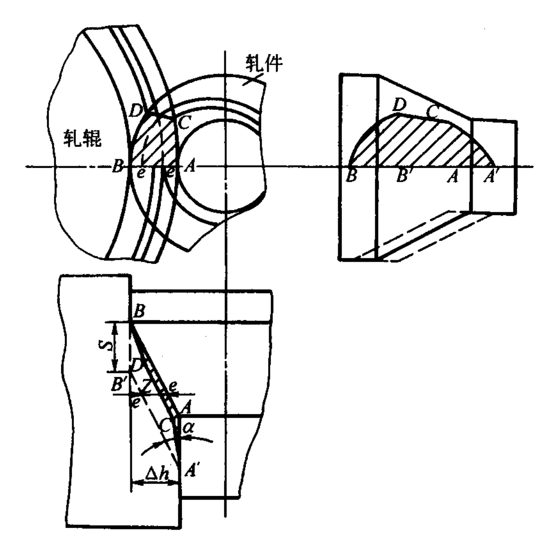


图 5.2-13　楔横轧接触面积的三面投影图

中间为直线变化。任一点的值为

$$Z=\frac{X_1}{S}Z_0=\frac{X_1}{S}\times\frac{1}{m}\pi d_K\tan\alpha\tan\beta \tag{5.2-35}$$

式中，X_1 为 A' 到所求位置之间的距离。

A' 点的 $X_1=0$，C 点的 $X_1=S$。

将式（5.2-35）代入式（5.2-27），便得到楔横轧中 $A'C$ 区域的旋转条件式为

$$\frac{\pi d_K\tan\alpha\tan\beta}{md}\leqslant\frac{\mu^2}{\left(1+\frac{d}{D}\right)\left(\frac{X_1}{S}\right)} \tag{5.2-36}$$

或

$$\tan\alpha\tan\beta\leqslant\frac{md\mu^2}{\pi d_K\left(1+\frac{d}{D}\right)\left(\frac{X_1}{S}\right)}$$

同理，可以求出楔横轧中 DB 区域的旋转条件式为

$$\tan\alpha\tan\beta\leqslant\frac{md\mu^2}{\pi d_K\left(1+\frac{d}{D}\right)\left(\frac{X_2}{S}\right)} \tag{5.2-37}$$

式中，X_2 为 B 到所求位置之间的距离。

B 点的 $X_2=0$，D 点的 $X_2=S$。

式（5.2-34）、（5.2-36）和式（5.2-37）可以用下面一个式子表达

$$\tan\alpha\tan\beta\leqslant\frac{md\mu^2}{\pi d_K\left(1+\frac{d}{D}\right)k} \tag{5.2-38}$$

这就是楔横轧旋转条件的普遍式。式（5.2-38）中的 k 值在 DC 区域为 1，在 $A'C$ 区域为 X_1/S，在 DB 区域为 X_2/S。

从式（5.2-38）不难看出，当轧制条件不变时，即 m、α、β、μ、d_0、d_1 及轧辊基圆直径 D_0 都已确定，沿轧制轴线变形区 $A'CDB$ 上任一截面的旋转条件都是不同的，在 CD 区域中 d、D、d_K 是变化的，在 $A'C$ 区域中 d_K、k 是变化的，在 DB 区域中 d、D、d_K、k 是变化的。

为了把这些因素对旋转条件的影响弄清楚，我们将在下一个问题中加以分析与讨论。

2.3 展宽角

展宽角 β（又称楔展角）是楔横轧中最主要的工艺参数之一，也是轧辊孔型设计中最主要的参数之一。β 角设计得越大，轧辊的直径 D_1 越小，这对轧辊的加工制造、节省模具的材料、减小整个设备的外形尺寸及重量等有利，但它受旋转条件的限制。

按旋转条件把式（5.2-38）改造成为

$$\beta\leqslant\arctan\left[\frac{md\mu^2}{\pi d_K\left(1+\frac{d}{D}\right)k\tan\alpha}\right] \tag{5.2-39}$$

那么，根据旋转条件，允许最大的展宽角 β'（或称极限展宽角）为

$$\beta'=\arctan\left[\frac{md\mu^2}{\pi d_K\left(1+\frac{d}{D}\right)k\tan\alpha}\right]$$

或

$$\beta'=\arctan\left[\frac{md\mu^2}{\pi d_K\left(\frac{1}{d}+\frac{d}{D}\right)k\tan\alpha}\right] \tag{5.2-40}$$

$$d_K=d_1+2g\Delta r$$

式中，g 为滚动系数。

一般 $g=0.4\sim0.7$（当轧过的顶面修低时 g 更大），若取 $g=0.5$ 则得到

$$\beta'=\arctan\left[\frac{m\mu^2}{\pi(d_1+\Delta r)\left(\frac{1}{d}+\frac{1}{D}\right)k\tan\alpha}\right] \tag{5.2-41}$$

（1）变形区极限展宽角 β' 的分布

在同一变形区内，m、μ、d_1、Δr、α 值是不变量，只是 d、D、k 三个值在变化。因此变形区内极限展宽角 β' 的变化就是因为这三个变量的变化引起的。

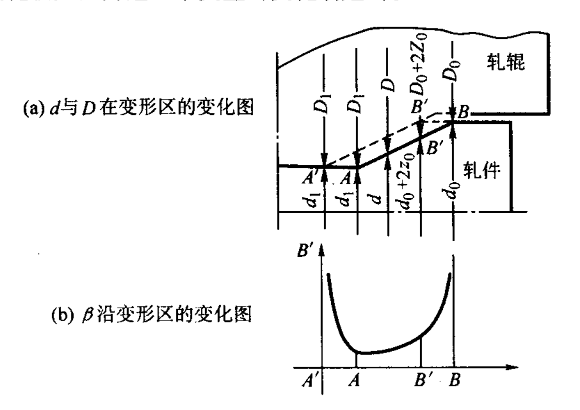


图 5.2-14 变形区中 d 与 D 的变化图

图 5.2-14 中可以看出从 A' 到 B 这个接触区中 d 与 D 的变化。

运用式（5.2-14）我们可以分析 A' 到 B 点各位置的极限展宽角 β'。

A' 位置：$d=d_1$，$D=D_1$，$k=0$，所以 $\beta'=90°$。

A 位置：$d=d_1$，$D=D_1$，$k=1$，所以

$$\beta'=\arctan\left[\frac{m\mu^2}{\pi\ (d_1+\Delta r)\ \left(\frac{1}{d_1}+\frac{1}{D_1}\right)\tan\alpha}\right] \quad (5.2\text{-}42)$$

B' 位置：$d=d_0-2Z_0$，$D=D_0+2Z_0$，$k=1$，所以

$$\beta'=\arctan\left[\frac{m\mu^2}{\pi\ (d_1+\Delta r)\ \left(\frac{1}{d_0-2Z_0}+\frac{1}{D_0+2Z_0}\right)\tan\alpha}\right] \quad (5.2\text{-}43)$$

B' 位置：$d=d_0$，$D=D_0$，$k=0$，所以 $\beta'=90°$。

从上面的分析不难看出，极限展宽角 β' 沿轴线是变化的，其分布如图 5.2-14 所示，最小值在 A 位置。

图 5.2-15 为沿变形区轴线方向极限展宽角 β' 的变化曲线。

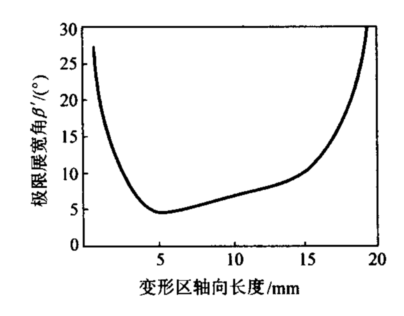


图 5.2-15 沿变形区轴线方向极限展宽角的变化曲线

$m=2$，$\mu=0.35$，$\alpha=30°$，$d_1=20$ mm，$\Delta r=10$ mm，$d_0=40$ mm，$\beta=6°$，$S=4.95$ mm，$Z_0=2.86$ mm

只要轧辊的展宽角小于或等于 A 位置的极限展宽角 β'_A，轧件的旋转是不成问题的。当展宽角 β 稍大于 β'_A 时也有可能旋转，因为除 A 点以外其余位置的极限展宽角 β' 都比 β'_A 大。

（2）μ、α、ξ_K、m、Δr 对极限展宽角 β' 的影响

1）摩擦因数 μ。理论分析与实践均表明摩擦因数是影响旋转条件的关键因素，自然也是影响 β' 的关键因素。图 5.2-16 表示按理论式（5.2-41）作出的 μ 与 β' 的关系曲线。从曲线可以看出，μ 对 β' 的影响很大。为了保证轧件旋转，或者说为了在设计中采用比较大的展宽角 β，轧制中最有效、最简便的方法是在成形斜面上刻痕，如图 5.2-16 所示。

2）成形角 α。成形角 α 对极限展宽角 β' 的影响关系表示在图 5.2-16 上。从图上可以看出，α 对 β' 影响也是不小的。但是，由于 α 受轧件中心疏松与拉伸产生缩颈的限制，一般 α 在 20°~35°范围内选取，在这个范围内 α 对 β' 的影响就不算大了。

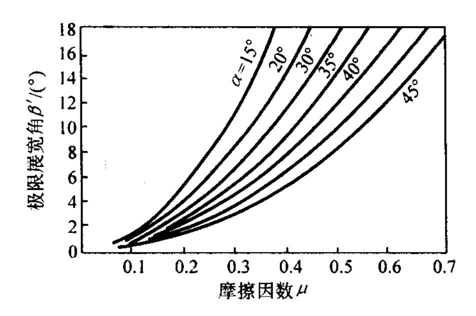


图 5.2-16 摩擦因数、成形角对极限展宽角的影响

3）轧辊与轧件直径比 ξ_K。令 $\frac{D_K}{d_K}=\xi_K$，且 $k=1$，$g=0.5$，即轧辊孔型的平均直径 $D_c=D_0+\Delta r$ 等于轧制直径 D_K（$d_c=d_1+\Delta r=d_K$）。这样就可以将式（5.2-41）改写成

$$\beta'=\arctan\left[\frac{m\mu^2}{\pi\tan\alpha\left(1+\frac{1}{\xi_k}\right)}\right] \quad (5.2\text{-}44)$$

根据式（5.2-44）作得的 ξ_K 与 β' 的关系曲线表示在图 5.2-17 上。可以看出：当 $\xi_K<5\sim6$ 时，ξ_K 对 β' 的影响较大；当 $\xi_K>5\sim6$ 时，ξ_K 对 β' 影响较小；而当 $\xi_K>10$ 时，ξ_K 对 β' 影响很小可以忽略。

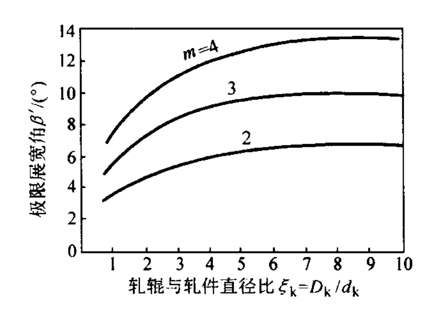


图 5.2-17 轧辊与轧件直径比与极限展宽角的关系曲线

4）轧辊个数 m。轧辊个数 m 对极限展宽角 β' 的影响表示在图 5.2-17 上。M 对 β' 的影响很直接。根据计算结果，可以把式（5.2-44）近似写成

$$\beta'\approx m\arctan\left[\frac{\mu^2}{\pi\tan\alpha\left(1+\frac{1}{\xi_k}\right)}\right] \quad (5.2\text{-}45)$$

即极限展宽角 β' 与轧辊个数 m 成正比。轧辊个数越多，极限展宽角 β' 越大，这是有利的一面。但是，轧辊个数越多，除增加一套轧辊辊系以及相应传动装置外，还受到最小轧件直径 $d_{1\min}$ 的限制，例如三辊轧制时 $d_{1\min}>0.154D_1$，四辊轧制时 $d_{1\min}>0.414D_1$。

5）总压缩量。总压缩量 Δr 对极限展宽角 β' 的影响从式（5.2-41）可以分析出来，从变形区在 β' 的分布也可以看出，

Δr 越大β'越小。当 $\Delta r < Z_0 = \frac{1}{m}\pi d_K \tan\alpha \tan\beta$ 时，就不存在 A 点这个最小极限角位置，此时的旋转条件更好，即展宽角β'可以大一些。

2.4 轧齐理论

在楔横轧的产品中，经常遇到带内直角台阶的阶梯轴，如图 5.2-18 所示。对这类零件，在设计模具时，都存在一个轧齐曲线问题。即模具的孔型按轧齐曲线设计与加工才能轧出内直角的台阶轴。

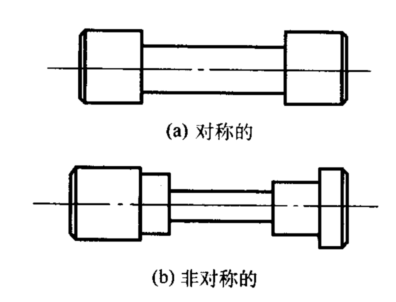


图 5.2-18 带内直角的阶梯轴

如果模具孔型设计不按轧齐曲线进行设计加工，而按图 5.2-19 所示的 AB 斜线一直宽展到内直角 I 点，然后从 I 点过渡到 D 点，这样的设计与加工虽然简单，但轧不出带内直角的阶梯轴，而是带螺旋纹的锥体。

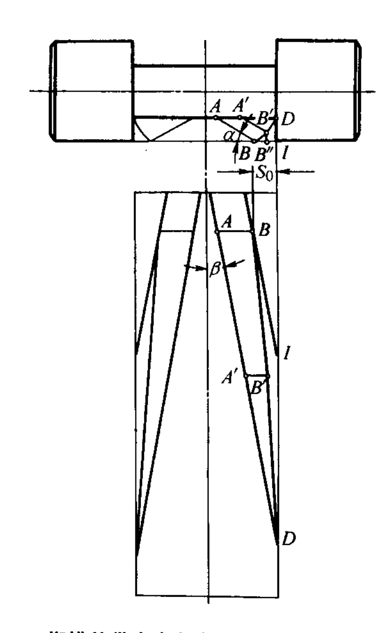


图 5.2-19 楔横轧带内直角台阶的阶梯轴模具孔型展宽图

所以，在设计模具孔型时，不能以 BID 这条折线，而应以斜面 $A'B'$ 与垂直面 $B'B''$ 的交点形成的曲线，即 $BB'D$ 这条曲线——轧齐曲线才能轧出内直角的阶梯轴。

(1) 提前量 S_0 的确定

如图 5.2-19 所示，若要轧制 ADI 这样的内直角阶梯轴，成形斜线 AB 展宽到 B 点，此点 B 距 I 的距离 S_0。成形斜线越往右越短（$A'B'$）一直到零；相反，轧制垂线越往右越长（$B'B''$），一直到这个 DI 台阶全部成形。

斜线 AB 宽展的终点处，即斜线 $A'B'$ 与垂线 $B'B''$ 的交点形成的轧齐曲线开始处，此时的 BI 距离称为提前量。

计算提前量的理论依据是 ABC 面绕轴旋转一周形成的空心锥体体积 V_{ABC} 应该等于 $CDEF$ 面绕轴心旋转一周形成的圆柱体体积 V_{CDEF}（图 5.2-20）即

$$V_{ABC} = V_{CDEF} \tag{5.2-46}$$

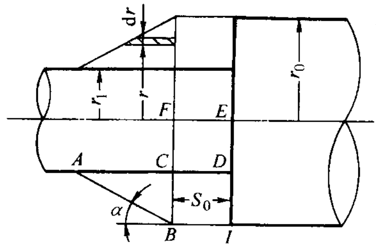


图 5.2-20 计算提前量 S_0 的图形

空心圆锥体体积用积分方法求出：

$$V_{ABC} = \int_{r_1}^{r_0} 2\pi r \mathrm{d}r (r_0 - r)\cot\alpha$$

$$= \frac{\pi}{3\tan\alpha}(r_0^3 - 3r_0 r_1^2 + 2r_1^3) \tag{5.2-47}$$

圆柱体体积 V_{CDEF} 为

$$V_{CDEF} = \pi r_1^2 S_0 \tag{5.2-48}$$

将式（5.2-47）、（5.2-48）代入式（5.2-46）整理后，得到提前量 S_0 的公式为：

$$S_0 = \frac{1}{\tan\alpha}\left(\frac{r_0^3}{3r_1^2} - r_0 + \frac{2r_1}{3}\right) \tag{5.2-49}$$

需要指出的是，计算提前量 S_0 的式（5.2-49）是按空心圆锥体考虑的，它只适用于斜线 AB 宽展到距 I 点 S_0 的距离时，宽展不再继续（$\beta = 0$），在原处精整成圆锥体的情况。但实际上很少这样做，因为这样做不仅需要增加模具长度，而且给模具加工带来困难。

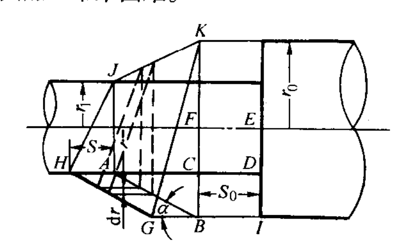


图 5.2-21 精确计算提前量 S_0' 的图形

所以，在精确计算提前量 S_0 时，除考虑空心圆锥体体积外，如图 5.2-21 所示，还应考虑 $ABKJHG$ 这块螺旋体体积 V_{ABKJHG}。

螺旋体体积 V_{ABKJHG} 用积分方法求出：

$$V_{ABKJHG} = \int_{r_1}^{r_0} \frac{1}{2}\pi r S \mathrm{d}r \tag{5.2-50}$$

式中，S 为瞬时展宽量。

$$S = \frac{1}{2}\pi d_K \tan\beta \tag{5.2-51}$$

式中，d_K 为轧件的滚动直径，$d_K \approx r_0 + r_1$。

将式（5.2-51）代入式（5.2-50）得：

$$V_{ABKJHG} = \frac{\pi^2(r_0 + r_1)\tan\beta}{4}\int_{r_1}^{r_0} r\mathrm{d}r$$

$$= \frac{\pi^2 \tan\beta}{8}(r_0 + r_1)^2(r_0 - r_1) \tag{5.2-52}$$

精确计算提前量的方法是 ABC 面绕轴心旋转一周形成的空心锥体体积 V_{ABC} 加上 $ABKJHG$ 这块螺旋体体积 V_{ABKJHG} 的两倍，应该等于 $CDEF$ 面绕轴心旋转一周形成的圆柱体体积 V_{CDEF}（图 5.2-21）即

$$V_{ABC} + 2V_{ABKJHG} = V_{CDEF} \tag{5.2-53}$$



将式（5.2-50）、（5.2-51）及（5.2-52）代入上式整理后，得计算提前量的精确值 S_0' 的公式为

$$S_0' = \frac{1}{\tan\alpha}\left(\frac{r_0^3}{3r_1^2} - r_0 + \frac{2r}{3}\right) + \frac{\pi\tan\beta}{4}\left(\frac{r_0^3}{r_1^2} + \frac{r_0^2}{r_1} - r_0 - r_1\right)$$

$$= S_0 + \frac{\pi\tan\beta}{4}\left(\frac{r_0^3}{r_1^2} + \frac{r_0^2}{r_1} - r_0 - r_1\right) \quad (5.2\text{-}54)$$

(2) 求轧齐曲线方程

不考虑非圆螺旋体积，求轧齐曲线比较容易，而考虑非圆螺旋体积精确确定轧齐曲线方程相当困难。所以，一般都不考虑非圆螺旋体积求出轧齐曲线方程，然后进行某些修正，这样做也能轧出相当理想的内直角台阶。

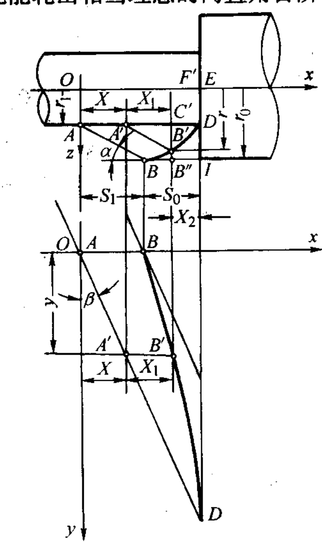


图 5.2-22 确定轧齐曲线方程的图形

求不考虑非圆螺旋体积的轧齐曲线方程的理论依据是轧齐曲线上任意一点 B'，由它决定的 $A'B'C'$ 面绕轴心旋转一周形成的空心圆锥体体积 V_{ABC}，应该等于 $C'DEF'$ 面绕轴心旋转一周形成的圆柱体体积 $V_{B'DEF'}$（见图 5.2-22），即

$$V_{A'B'C'} = V_{C'DEF'} \quad (5.2\text{-}55)$$

而

$$V_{A'B'C'} = \frac{\pi}{\tan\alpha}\left(\frac{r^3}{3} - rr_1^2 + \frac{2r_1^3}{3}\right) \quad (5.2\text{-}56)$$

式中，r 为轧齐曲线上任意一点 B' 的半径，$r = r_1 + X_1\tan\alpha$（X_1 为 $A'B'$ 在 x 轴上的投影长度）。

将 X_1 与 r 的关系代入式（5.2-56）整理后，得：

$$V_{A'B'C'} = \pi\left(\frac{\tan^2\alpha}{3}X_1^3 + r_1\tan\alpha X_1^2\right) \quad (5.2\text{-}57)$$

而

$$V_{CDEF'} = \pi r_1^2 X_2 \quad (5.2\text{-}58)$$

式中，X_2 为轧齐曲线上任意一点 B' 至内直角边 DI 的距离。

$$X_2 = S_1 + S_0 - (X + X_1) \quad (5.2\text{-}59)$$

式中，S_1 为 AB 在 x 轴的投影长度；S_0 为不考虑非圆体积的提前量；X 为 A' 在 x 轴上的坐标值。

$$S_1 = \frac{r_0 - r_1}{\tan\alpha} \quad (5.2\text{-}60)$$

将式（5.2-59）代入式（5.2-58）得：

$$V_{C'DEF'} = \pi r_1^2(S_1 + S_0 - X - X_1) \quad (5.2\text{-}61)$$

将式（5.2-57）、式（5.2-61）代入式（5.2-55）整理后，得：

$$X = S_1 + S_0 - X_1 - \frac{\tan\alpha}{r_1}X_1^2 - \frac{\tan^2\alpha}{3r_1^2}X_1^3 \quad (5.2\text{-}62)$$

再将式（5.2-60）、式（5.2-49）代入式（5.2-62）得到轧齐曲线方程为

$$X = \frac{1}{\tan\alpha}\left(\frac{r_0^3}{3r_1^2} - \frac{r_1}{3}\right) - X_1 - \frac{\tan\alpha}{r_1}X_1^2 - \frac{\tan^2\alpha}{3r_1^2}X_1^3 \quad (5.2\text{-}63)$$

式中，X_1 为斜线 AB 在 x 轴上的投影长度。

因为

$$Y = \frac{X}{\tan\beta} \quad (5.2\text{-}64)$$

式中，Y 为 A' 和 B' 在 Y 轴上的投影长度。

将式（5.2-63）代入式（5.2-64）后，轧齐曲线还可以写成：

$$Y = \frac{1}{\tan\beta}\left[\frac{1}{\tan\alpha}\left(\frac{r_0^3}{3r_1^2} - \frac{r_1}{3}\right) - X_1 - \frac{\tan\alpha}{r_1}X_1^2 - \frac{\tan^2\alpha}{3r_1^2}X_1^3\right] \quad (5.2\text{-}65)$$

轧齐曲线方程式（5.2-63）、（5.2-64）都是在 xOy 面上的（图 5.2-22 下图），而轧齐曲线在 xOz 面上的方程（图 5.2-22 上图），只要对式（5.2-63）、式（5.2-64）稍加改造即可得到。

令 $X' = X + X_1$ 并将 $X_1 = (r - r_1)/\tan\alpha$ 代入式（5.2-63）整理后，便得到 xOz 面上的轧齐曲线方程为

$$X' = X + X_1 = \frac{1}{\tan\alpha}\left[\left(\frac{r_0^3}{2r_1^2} - r_1\right) + r - \frac{r^3}{3r_1^2}\right] \quad (5.2\text{-}66)$$

将式（5.2-66）和 r 改换成 z 整理后，轧齐曲面的空间方程为

$$X_1 + Y\tan\beta - \frac{1}{\tan\alpha}\left[\left(\frac{r_0^3}{3r_1^2} - r_1\right) + Z - \frac{Z^3}{3r_1^2}\right] = 0 \quad (5.2\text{-}67)$$

显然，Z 与 X_1 还存在下列关系：

$$Z = r_1 + X_1\tan\alpha \quad (5.2\text{-}68)$$

轧齐图线的加工比较困难，在实际加工中，常用一段或两段直线去连接 BD 两点，也可轧出较为理想的内直角台阶。

3 变形机理

3.1 有限元数值模拟

(1) 有限元数值模拟的意义

准确掌握楔横轧轧件上每一点的应力、应变与金属的流动有重要意义，因为它是认识和解决楔横轧中零件成形规律、缺陷发生原因、轧制力能参数大小等的基础。

为此，人们用密栅云纹方法、滑移线方法、上限法方法、光塑性方法等来研究并分析楔横轧轧件截面上的应力、应变与金属的流动。其研究结果，对认识并解决楔横轧中的某些理论与实际问题起到了积极作用。由于楔横轧轧制过程属于特殊复杂的三维非线性塑性成形，上述方法许多情况下做不出结果，或者出来的结果的精度比较差。

20 世纪后半叶，由于计算机技术迅速发展，大型计算机软件的出现，为塑性有限元数值模拟创造了有利条件，人们开始用它研究、分析与解决锻造、轧制中的问题。由于塑性有限元数值模拟，与滑移线法、上限法等比较，能解决更为特殊复杂问题，包括弹性、塑性与黏性复合问题、三维变形问题、温度不均问题、材料加工硬化问题等，所以有限元数值模拟方法成为当今解决复杂塑性成形问题的主要方法。

用有限元数值模拟方法研究楔横轧问题，开始于 20 世纪 90 年代末本世纪初的英国、美国与中国。北京科技大学《零件轧制研究与推广中心》，得到国家自然科学基金委的批



准与资助，承担了重点课题《零件精确轧制成形机理与多学科仿真》（2001～2003）的研究。其研究重点内容之一是对楔横轧进行全面的有限元数值模拟计算，并与轧制实验，光塑性实验相结合，进行深入系统的理论分析，研究和解决楔横轧中的成形规律与零件质量等问题。本章内容是在这项工作基础上完成的。

（2）有限元数值模拟模型

基本上应用比较适合于楔横轧工艺的两个大型有限元软件。一个是 ANSYS/LS－DYNA3D，软件采用 8 节点六面体实体单元，弹塑性的材料模型。该软件的优点是具有较强的后处理，能获得丰富的轧件应力应变信息，反映的应力应变趋势较好，计算时间短。缺点是不能自动重新划分网格，当变形较大时，计算精度降低。另一个是 DEFORM3D，软件采用 4 节点四面体实体单元，刚塑性的材料模型。其优点是轧件成形形状较好，缺点是软件后处理能获得的信息量有限，残余应力在轧制过程中的影响没有考虑。所以一般用 ANSYS/LS－DYNA3D 计算应力应变场，而用 DEFORM3D 计算变形。

楔横轧轧制运动几何模型，是按图 5.2-9 建立的。

模具与轧件的工艺几何参数如图 5.2-23 所示。

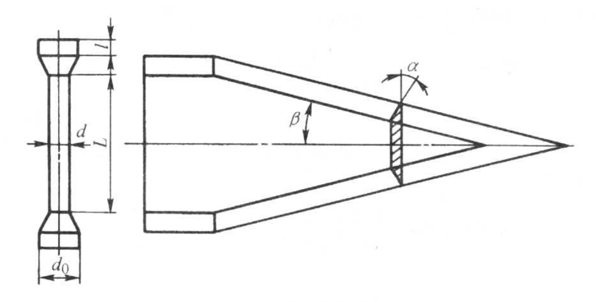


图 5.2-23　模具与轧件工艺几何参数图

有限元数值模拟与轧制实验以钢为材料，故选择轴类零件常用有代表性的 45 钢为材料模型。45 钢在 1 050℃下的应力－应变关系，用以多段直线逼近的曲线模型，如图 5.2-24 所示。

为了方便有限元数值模型的建立，减少计算时间和硬盘空间，同时又要保证计算的真实与精度，保证主要的忽略次要的，在建立模型时作了如下简化与假设。

1）热轧时由于轧制总压力不大，忽略轧辊的弹性变形与模具局部压扁变形，将轧辊与模具视为刚体。

2）忽略轧制时轧件与模具、空气接触时的热传导与交换，认为轧件在轧制时温度保持恒定。

3）模具与轧件接触部分为库仑摩擦，其摩擦因数视为常数。

4）轧制时轧件与导板无接触，即轧件与两个模具的轧制条件完全对称。

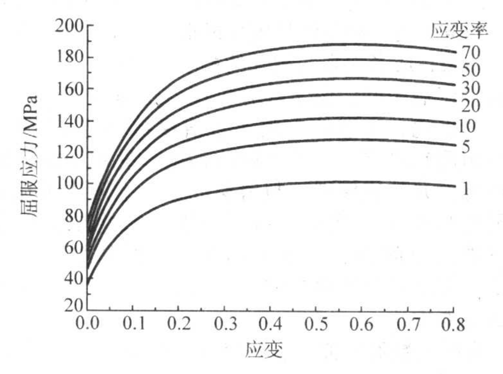


图 5.2-24　45 钢的应力－应变曲线

5）对称轧制，模具与轧件可取一半进行计算等。

Pro/E 软件环境下，经二次开发建立楔横轧模具与轧件的三维参数化模型。其典型楔横轧的几何模型，如图 5.2-25 所示。

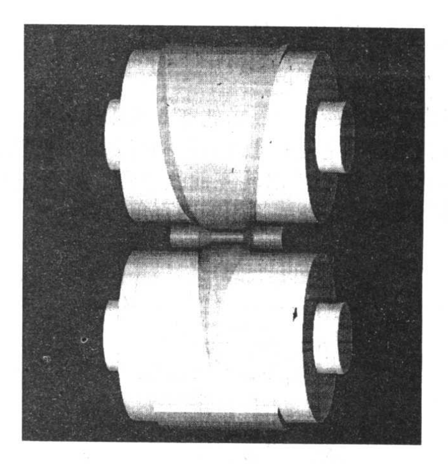


图 5.2-25　典型楔横轧模具几何模型

用 ANSYS/LS－DYNA 有限元软件建立楔横轧三维非线性有限元分析模型，如图 5.2-26 所示，模拟了楔横轧的全过程，包括楔入段、展宽段和精整段。

楔横轧基本轧制过程的有限元模拟主要有三个步骤。

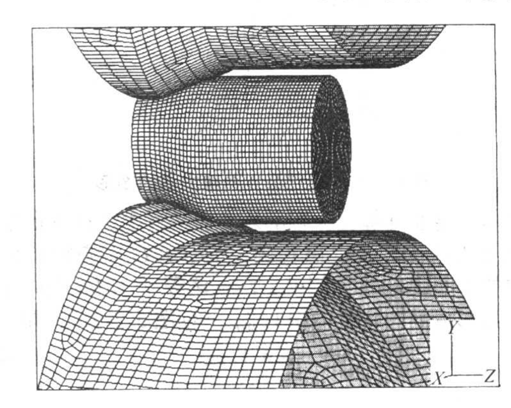


图 5.2-26　楔横轧有限元模型

1）前处理。确定模具与轧件的主要参数，输入模具模型，生成轧件模型，给定模具与轧件的边界条件等。

2）计算求解。将前处理完成后形成的信息文件模型编辑后，在 LS－DYNA 求解器中求解。本书内容涉及的模型，其模具与轧件的总单元数一般在 50 000～80 000 个之间。

3）后处理。求解完成后，在 ANSYS 软件中进行分析，得到轧件在不同位置，不同时刻的有关信息。

3.2　轧件上的应变场

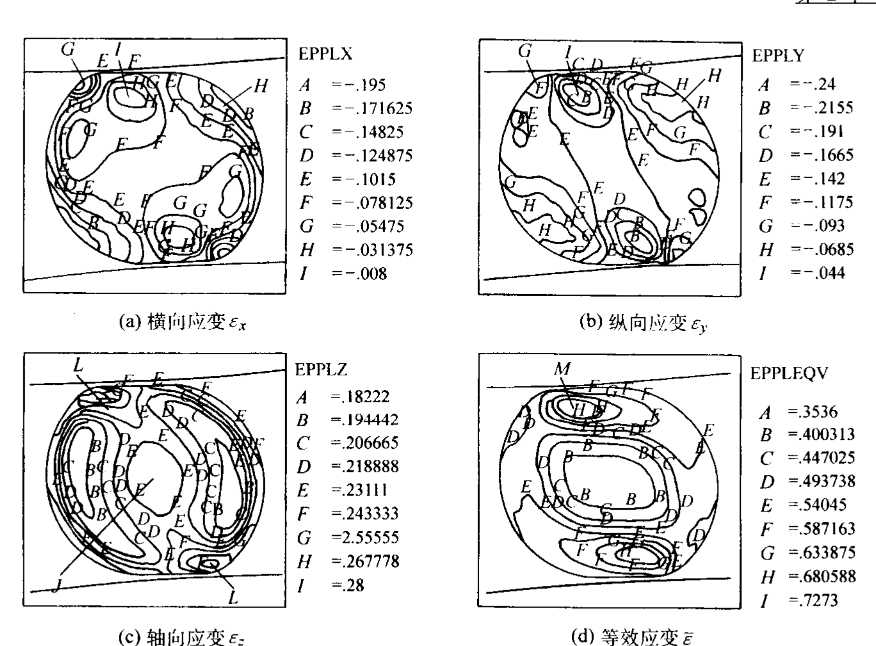
楔横轧的全过程包括：楔入段、展宽段与精整段，这里只阐述最有代表性的展宽段的应变场。

（1）横截面上的应变分布

楔横轧展宽段横截面上的应变分布，如图 5.2-27 所示。

在观察分析轧件应变应力场时，需要指出的是：将轧机作为参照物，即轧件相对轧机在旋转，轧件上的任一点都在不断地改变位置，同样一点当旋转 90°后，x 向与 y 向变换一次，当轧件旋转一周时，将转换两次，以此类推。

从图 5.2-27 可以看出，在展宽段轧件横截面上产生很不均匀的应变场 ε_x、ε_y、ε_z，但存在基本趋势与规律，即横向应变 ε_x 与纵向应变 ε_y 主要是压缩应变，轴向应变 ε_z 主要是拉伸应变，再叠加上模具作用产生的应变。



(a) 横向应变 ε_x　(b) 纵向应变 ε_y

(c) 轴向应变 ε_z　(d) 等效应变 $\bar{\varepsilon}$

图 5.2-27　楔横轧展宽段横截面上应变场

$\alpha = 28°$　$\beta = 8°$　$\psi = 40\%$　$d = 40$ mm

图 5.2-27a 为横截面上横向应变 ε_x 的分布，其特点是整个截面上都是压缩应变，但分布很不均匀，最大值为 -0.195，发生在入口与出口的附近，如图 5.2-27a 中 G、H 处，最小值为 -0.03，发生在与模具接触部位下面，如图 5.2-27a 中 I 处。可以认为在横截面直径方向被均匀压缩，再加上模具作用产生的拉伸与压缩叠加综合的结果。

图 5.2-27b 为横截面上纵向应变 ε_y 的分布。其特点与上面横向应变 ε_x 相同的是：整个横截面上都是分布很不均匀的压缩应变。不同的是：应变的大小正好相反，即最大值 -0.240 发生在与模具接触部位下面，如图 5.2-27b 中的 I 处，最小值为 -0.044，发生在入口与出口附近，如图 5.2-27b 的 G、H 处。

图 5.2-27c 为横截面上轴向应变 ε_z 的分布。其特点是整个横截面上都是拉伸应变，但分布不均匀，最大值为 +0.28，发生在入口附近，如图中 L 处。在 $L-L$ 连线附近的应变场比较大。

从图 5.2-27 可以看出在展宽段下横截面上变形均为二向压缩（y 向与 x 向），一向拉伸（z 向）。图 5.2-28 的 G、I、H、J 点为横截面上四个点的应变方向图。

从反映的应变强度的等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 看，如图 5.2-27d 所示，在与模具接触下的局部最大，达到 0.73，如图中 M 处，其次在整个圆周的外层，越往中心越小，中心只有 0.35。说明楔横轧展宽段轧件的变形强度外层最大，逐步向中心减少，这是楔横轧轧件变形重要特征之一。

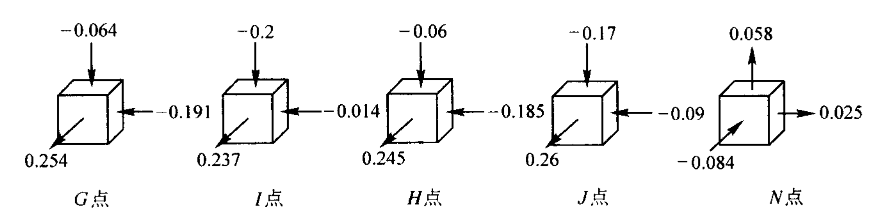


图 5.2-28　轧件典型位置应变方向图

(2) 纵截面上的应变分布

楔横轧展宽段纵截面上的应变分布，如图 5.2-29 所示。

图 5.2-29a 为纵截面上横向应变 ε_x 的分布。在左端已轧细部分均为压缩应变，分布比较均匀，其压缩应变在 -0.28 ~ -0.15 之间，在成形区内由左向右逐步减小。在成形面入口下面由于横向延伸出现局部拉应力，如图 5.2-29a 中 N 处，其值为 +0.061。在轧件成形区外的右端未发生任何变形，其应变值为零。

图 5.2-29b 为纵截面上纵向应变 ε_y 的分布。在左端已轧细部分与右端未轧部分的纵向应变 ε_y 与横向应变 ε_x 的分布与大小基本相近。在成形区内的纵向应变 ε_y 与横向应变 ε_x 的分布也大致相同，同样在成形面入口下面由于成形区的压缩造成局部不大的拉应力，其值为 +0.069。在轧件成形区外的右端未发生任何变形，其应变值为零。

图 5.2-29c 为纵截面上轴向应变 ε_z 的分布。在左端已轧细部分均为拉伸应变，其最大值为 +0.517，其值向右逐步减少直到成形区的根部。在成形区里面基本上为拉伸应变，在成形区入口下面，如图 5.2-29a 所示的 N 处，由于金属轴向流动受阻，所以在这里出现局部不大的压缩应变。在轧件成形区外的右端未发生任何变形，其应变值为零。图 5.2-28 显示了 N 点 z 向压缩变形，x 与 y 方向拉伸变形的应变方向。

图 5.2-29d 是纵截面上的等效应变分布，从中可以看出变形强度由右向左增加，即等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 由零增加到 1 左右。

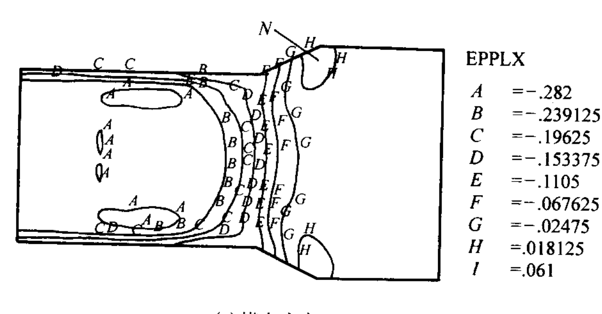
(3) 横截面上的等效应变特征

等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 是反映变形强弱的指标，楔横轧变形过程中，轧件截面所处位置不同其等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 的强弱是不同的。

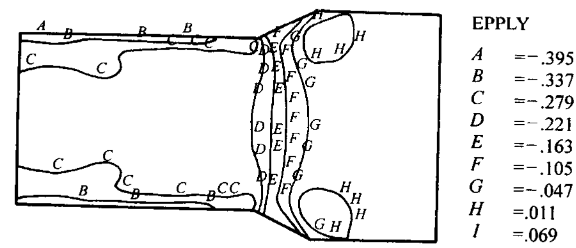
成形区位置不动，截面位置改变如图 5.2-30 所示，截面在不同位置下的等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 的变化，如图 5.2-31 所示。

以成形区入口为基准，截面距它的距离为 L，共有 6 种截面位置，其对应等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 分别表示在图 5.2-31a ~ 图 5.2-31f 中。可以看出：

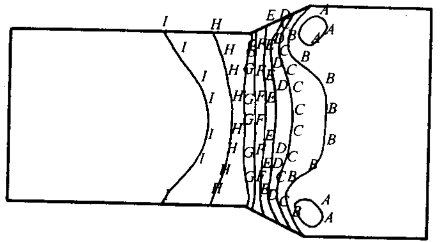




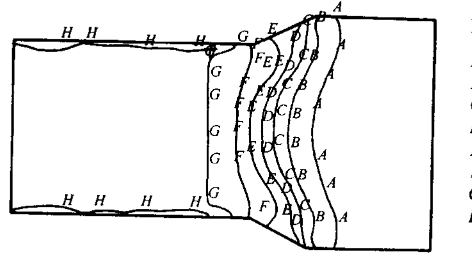
(a) 横向应变 ε_x



(b) 纵向应变 ε_y



(c) 轴向应变 ε_z



(d) 等效应变 $\bar{\varepsilon}$

图 5.2-29 楔横轧展宽段纵截面上的应变场

$\alpha=28°$ $\beta=8°$ $\psi=40\%$ $d=40$ mm

1）在成形区外的截面上，等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 只发生在外层，中心并未发生等效应变（图 5.2-31a）。进了成形区，在截面上才整体发生等效应变（图 5.2-31b～f）。

2）等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 随 L 的增加而增加，即从 0.22 增加到 1.01。

3）当 $L>22.7$ mm 时，截面上的等效应变场基本上不再变化。

3.3 轧件的变形

（1）用网格法观察轧件的变形

用有限元划分网格的方法，可以观察到楔横轧轧件轧前与轧后金属变形的变化及其特点。图 5.2-32 为楔横轧轧件轧前与轧后网格变化图。

图 5.2-32a 为轧件轧前外表面上网格划分图，都是接近于正方形的网格。图 5.2-32b 为轧件轧后外表面变形后的网格图。图 5.2-32c 为轧件轧前横截面上的网格划分图，都是近似正方形网格。图 5.2-32d 为轧件轧后横截面变形后的网格。可以清楚看出轴向正方形网格变成长方形网格，径向边长缩短，即径向压缩，而轴向延伸了，同时接近于表面的网格扭曲显著，说明轴向和径向产生了较大的剪切变形。

图 5.2-33 为轧件纵向按一个网格取出一片，观察轧前轧后的变形。图 5.2-33a 为轧件轧前网格主视图；图 5.2-33b 为轧件轧后的网格主视图，图 5.2-33c 为轧件轧前俯视图；图 5.2-33d 为轧件轧后俯视图。

从图 5.2-32 与图 5.2-33 中可以看出，在成形区里，网格变形激烈，即由刚进入时的接近正方形变形为结束时的长方形；轧件未进入成形区部分，基本上是正方形；在轧件的端部出现了凹心。

从图 5.2-32 还可以看出，轧件表面网格轧后沿轴线方向发生了扭转，其扭转方向与轧件旋转的方向相反。图 5.2-33a 为轧件轧前沿轴线取出一片网格，两条轴线是平行的，图 5.2-33b 为轧件轧后这片网格的变形。可以清楚看出这片网格发生与轧件旋转相反方向扭转，其原因如图 5.2-32 所示，由于模具圆周上的 B 点，其圆周速度小于轧件 B 点的圆周速度，造成模具给轧件 B 点一个与旋转方向相反方向的摩擦力。实际上不只是 B 点，在 BK 这一段都出现与旋转方向相反方向的摩擦力，造成与轧件方向相反的扭转变形。

（2）用位移法观察金属的轴向流动

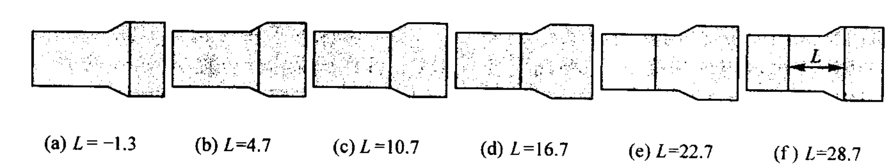
用有限元划分节点的方法，可以观察到楔横轧轧件轧前与轧后任何位置金属流动情况。

图 5.2-34 为轧件节点位置图。图 5.2-34a 为轧件节点轧前轴向位置图，图中 A、B、C、D、E 分别为 5 个截面的轴向位置，之间等分间距为 8 mm。图 5.2-34b 为轧件轧前横截面，在纵向直径上划为 40 个节点，圆心节点为 0，往上 20 个，往下 20 个。图 5.2-34c 为轧件节点轧后轴向位置图。图 5.2-34 为轧件轧后 40 个节点的轴向位移图，图 5.2-35 为轧件轧后轴向位置图。

从图 5.2-35 与图 5.2-36 可以看出：

1）截面上 20 个节点轴向位移是不等的，其特点是中心节点 0 处位移最小，位移随半径方向增加而增大，在节点 16～17 达到最大，然后递减到节点 20。说明轧件外层较中心轴向移动量大，但由于模具给轧件表面的摩擦，最外层的轴向移动小一些，稍里一些最大。

2）轧件截面位置不同，其截面上不同节点的轴向位移也不同，如图 5.2-35 所示。可以看出，离轧件起楔位置越远，或者说离轧件成形区越近的截面上的 20 个节点，其轴向位移越大。



(a) $L=-1.3$ (b) $L=4.7$ (c) $L=10.7$ (d) $L=16.7$ (e) $L=22.7$ (f) $L=28.7$

图 5.2-30 选取截面位置示意图

L—与斜楔作用位置的距离，mm

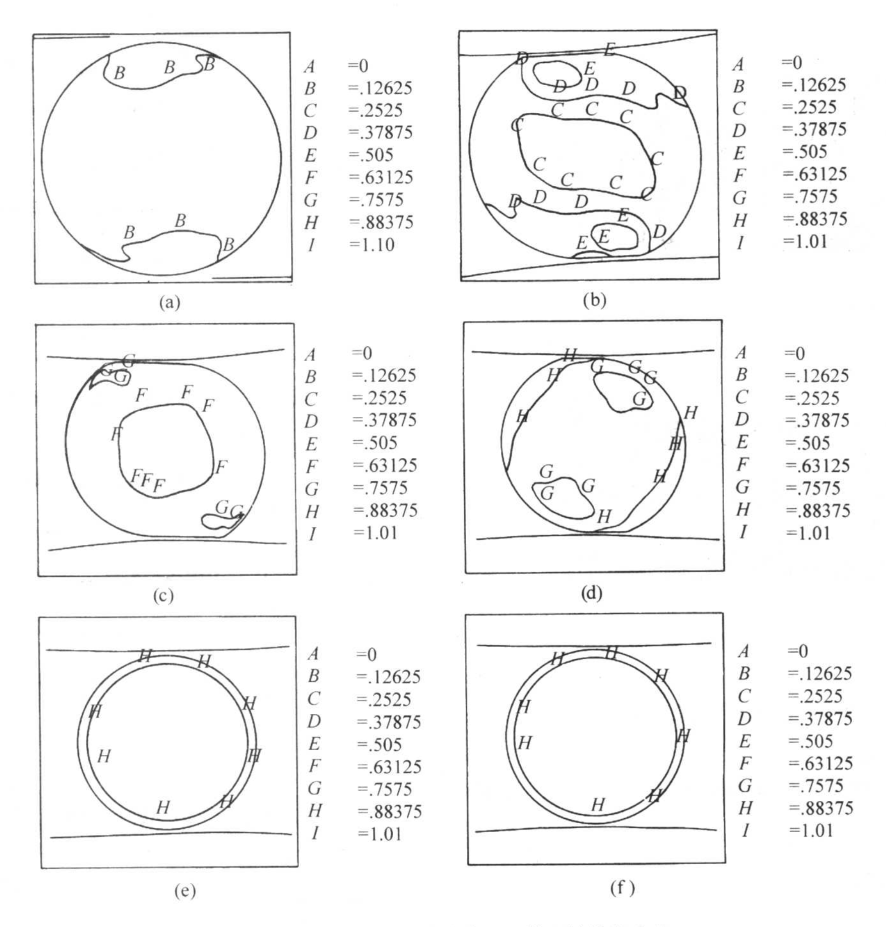
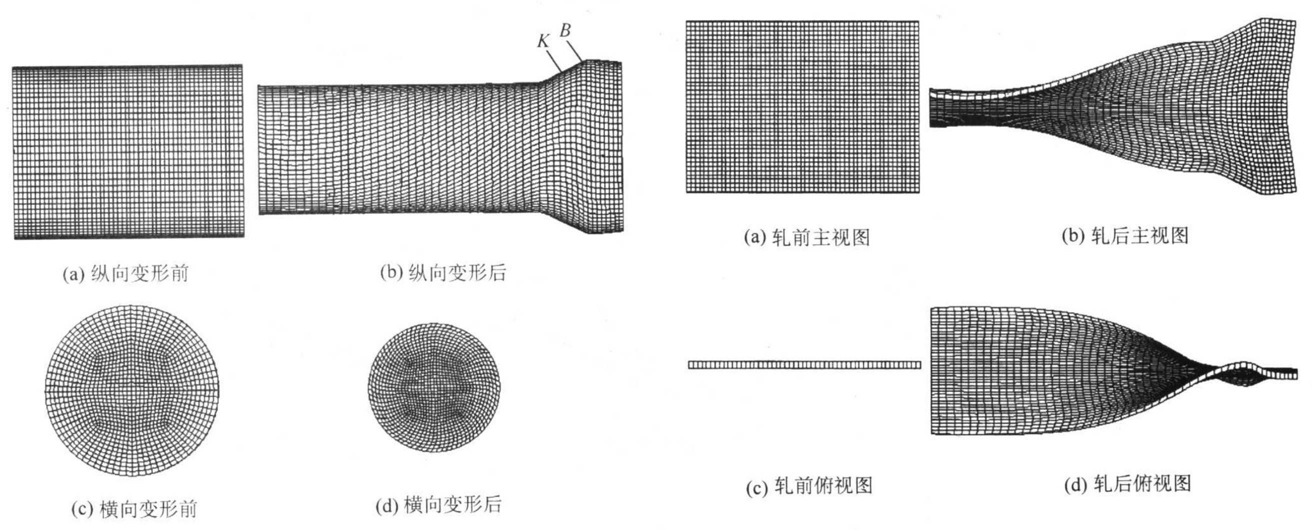


图 5.2-31　成形区不动轧件不同截面的等效应变



(a) 纵向变形前　(b) 纵向变形后

(c) 横向变形前　(d) 横向变形后

图 5.2-32　轧件网格的变形

(a) 轧前主视图　(b) 轧后主视图

(c) 轧前俯视图　(d) 轧后俯视图

图 5.2-33　轧件单片网格变形

3）越靠近轧件的端头，截面上节点的最大位移与最小位移差值越大，如图 5.2-35 与图 5.2-36 所示。E 截面的位移差值大于 D 截面的位移差值，而 D 截面的位移差值大于 C 截面的位移差值，余此类推。这是轧件端面出现凹心的原因所在，也是楔横轧变形又一重要特征。

（3）主要参数对轴向变形的影响。

1）断面收缩率 ψ 的影响。图 5.2-37 表示不同断面收缩率对 A、B、C 三个截面上节点轴向位移的影响。

从图 5.2-37 可以看出如下几点。

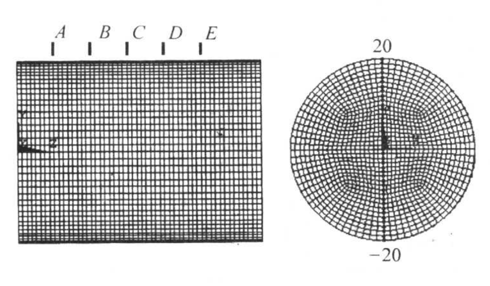
① 截面上最大位移量发生在离表面不远的内层，如图 5.2-37 所示的 15 ~ 17 节点。

② 最大位移：$\psi = 15\%$ 时小，$\psi = 35\% \sim 45\%$ 时大，断面收缩率 $\psi = 65\%$ 时又变小。

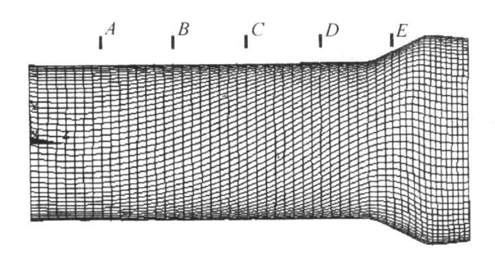
③ 三个截面上的最大位移量差值：$\psi = 15\%$ 时最小，$\psi = 35\% \sim 55\%$ 时最大，$\psi = 65\%$ 时又变小。轧件表面点的位移（图 5.2-37 中 20 节点）与中心点的位移（图 5.2-37 中的 0 点）比较：$\psi = 15\% \sim 45\%$ 时，表面点均大于中心点。$\psi > 55\%$ 时，表面点出现小于中心点情况。这是由于大的断面收缩率，变形已经深透到轧件中心，而轧件表面受模具摩擦的影响，反而滞后了。

2）成形角 α 的影响。图 5.2-38 表示不同成形角 α 对 A、B、C 三个截面上节点轴向位移的影响。





(a) 轧前截面轴向位置　　(b) 截面节点位置



(c) 轧后截面轴向位置

图 5.2-34　楔横轧轧件节点位置变化图

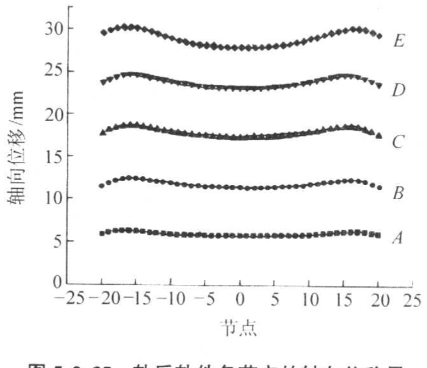


图 5.2-35　轧后轧件各节点的轴向位移量

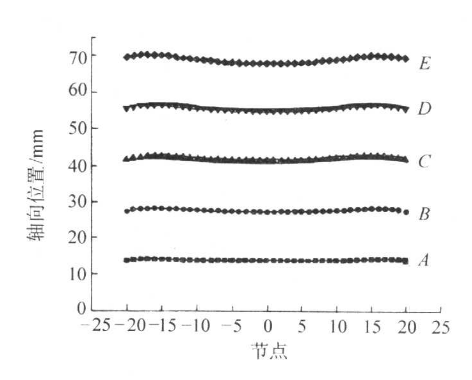


图 5.2-36　轧后轧件各节点的轴向位置

从图 5.2-38 中可以看出如下几点。

① 截面上最大位移量发生在离表面不远的内层，如图 5.2-38 中 15 ~ 17 节点。

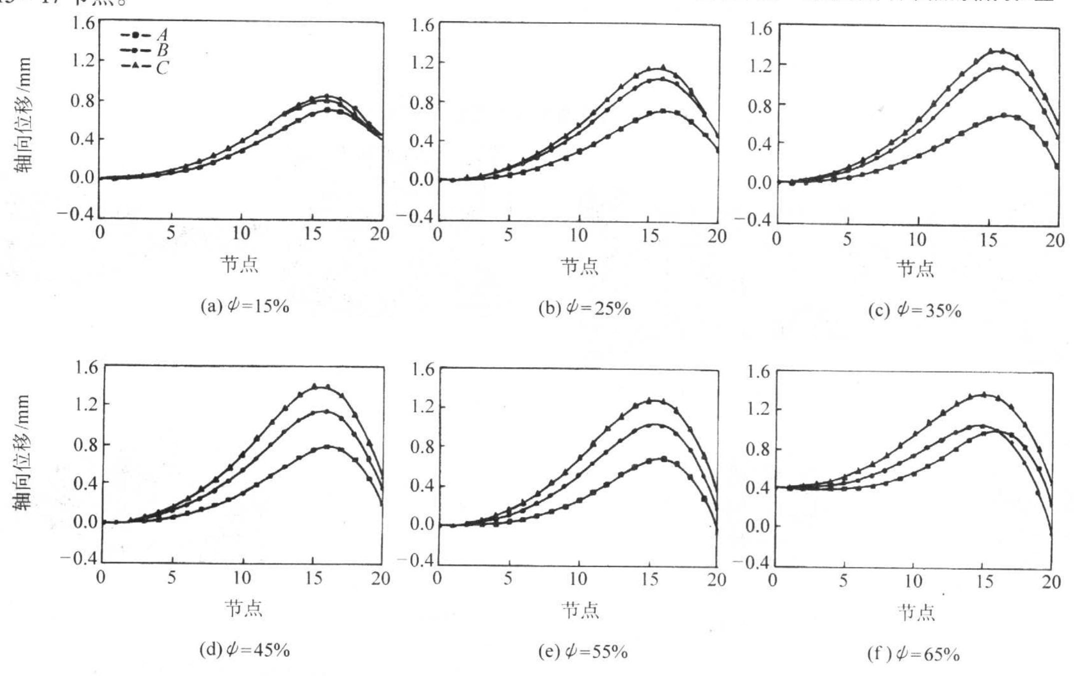


图 5.2-37　断面收缩率对节点轴向位移的影响

$\alpha = 30°$　$\beta = 7.5°$　$d = 35$ mm

② 最大位移量：$\alpha = 30°$时最大，$\alpha = 25°$时次之，$\alpha = 20°$时最小。

③ 三个截面上最大位移量差值：$\alpha = 30°$时最大，$\alpha = 25°$时次之，$\alpha = 20°$最小。表面点的位移与中心点的位移：$\alpha = 30°$时相差很小，$\alpha = 25°$时表面滞后，当 $\alpha = 20°$时表面滞后增大，说明当成形角 $\alpha = 20°$时，由于成形面长度加大，加重阻碍轧件表面金属的流动。

3）展宽角 β 的影响。图 5.2-39 表示不同展宽角 β 对 A、B、C 三个截面上节点轴向位移的影响。

从图 5.2-39 可以看出如下几点。

① 截面上最大位移量发生在离表面不大的内层，如图 5.2-39 中的 15 ~ 17 点。

② 最大位移量：$\beta = 5°$时最大，$\beta = 7.5°$时次之，$\beta = 10°$时最小。

③ 三个截面上最大位置量差值：$\beta = 5°$时最大，$\beta = 7.5°$时次之，$\beta = 10°$时最小。表面点的位移与中心点位移：$\beta = 5°$时相差大，$\beta = 7.5°$时相差次之，$\beta = 10°$时相差小。

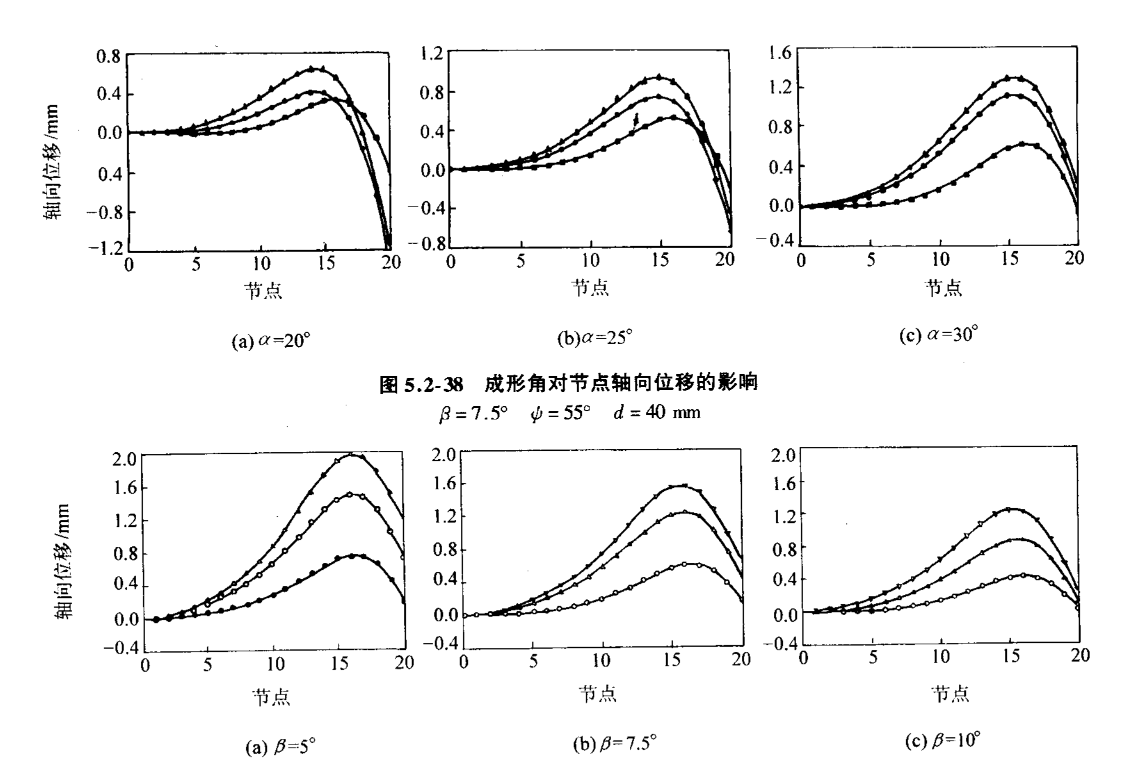


图 5.2-38 成形角对节点轴向位移的影响

$\beta = 7.5^\circ \quad \psi = 55^\circ \quad d = 40$ mm

图 5.2-39 展宽角对节点轴向位移的影响

$\alpha = 30^\circ \quad \psi = 35\% \quad d = 40$ mm

3.4 轧件上的应力场

楔横轧的全过程包括：楔入段、展宽段与精整段，这里只阐述最有代表性的展宽段的应力场。

(1) 横截面上的应力分布

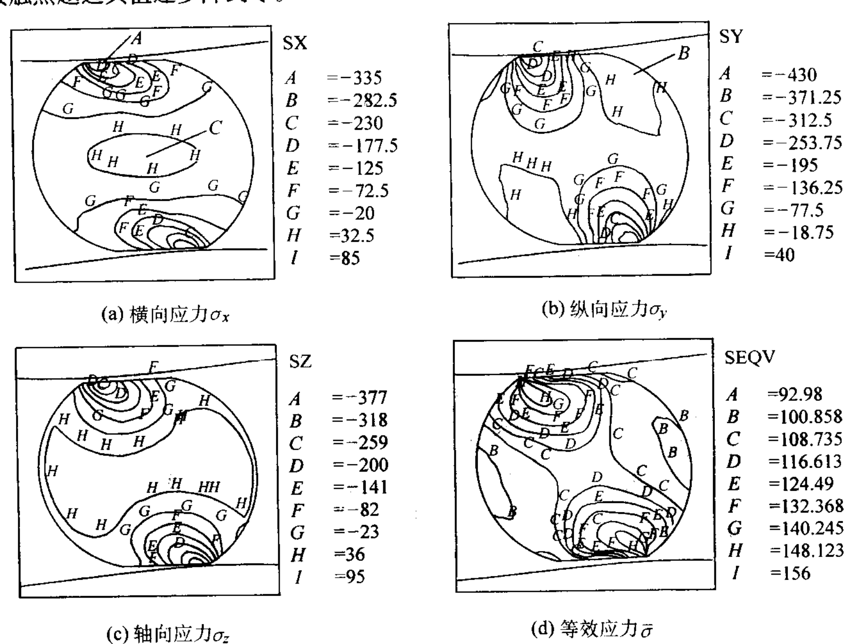
楔横轧展宽段横截面上的应力分布如图 5.2-40 所示。

从图 5.2-40 可以看出，在轧件与模具接触的局部，由于金属流动受阻，造成横向应力 σ_x、纵向应力 σ_y 与轴向应力 σ_z 均为比较大的压应力，在接触点最大，达到 − 335 ~ − 430 MPa 之间。离接触点越远其值逐步降到零。

图 5.2-40a 为横向应力 σ_x 的分布，非常明显的显示了由于轧件横向变形，在轧件中心产生拉应力，数值为 + 85 MPa。

图 5.2-40b 为纵向应力 σ_y 的分布，在轧件出口局部，由于接触局部径向变形的带动，出现拉应力，其值为 + 40 MPa，在轧件的中心应力很小，基本上为零。

图 5.2-40c 为轴向应力 σ_z 的分布，在轧件中心及通过中心的水平方向，均出现较大的拉应力，数值为 + 95 MPa，这是由于轧件与模具接触局部发生强烈轴向流动造成的。



(a) 横向应力 σ_x　(b) 纵向应力 σ_y

(c) 轴向应力 σ_z　(d) 等效应力 $\bar{\sigma}$

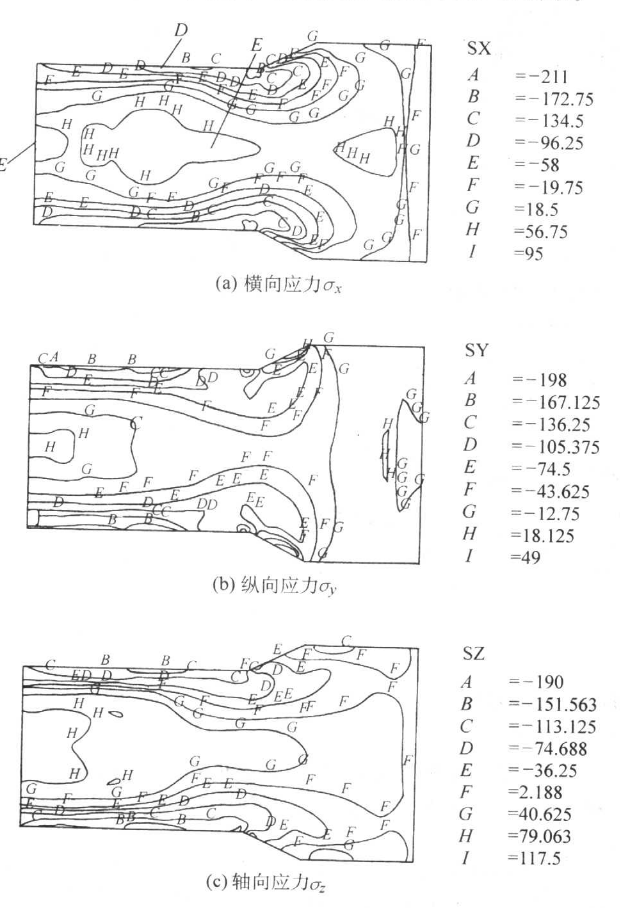
图 5.2-40 楔横轧展宽段横截面上的应力场

$\alpha = 28^\circ \quad \beta = 8^\circ \quad \psi = 40\% \quad d = 40$ mm



（2）纵截面上的应力分布

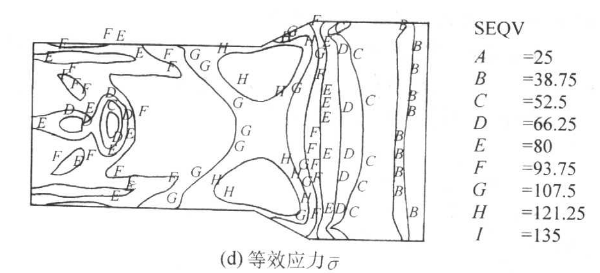
楔横轧展宽段纵截面上的应力分布如图 5.2-41 所示。



(a) 横向应力 σ_x

(b) 纵向应力 σ_y

(c) 轴向应力 σ_z



(d) 等效应力 $\bar{\sigma}$

图 5.2-41　楔横轧展宽段纵截面上的应力场

$\alpha=28°$　$\beta=8°$　$\psi=40\%$　$d=40$ mm

从图 5.2-41 可以看出，在轴向轧件与模具接触整个外层，横向应力 σ_x、纵向应力 σ_y 与轴向应力 σ_z 都为压应力，最大值达到 −190 ~ −211 MPa，从外层向中心逐步减少为零。

图 5.2-41a 为横向应力 σ_x 的分布。沿轴向轧件中心都出现拉应力，其值在 61 ~ 95 MPa 之间。

图 5.2-41b 为纵向应力 σ_y 的分布。沿轴向轧件中心出现不大的拉应力或者压应力，数值为 −50 ~ +50 MPa。50 MPa 的拉应力发生在起楔位置，−50 MPa 的压应力发生在成形面位置。

图 5.2-41c 为轴向应力 σ_z 的分布。沿轴向轧件中心产生较大的拉应力，数值为 +30 ~ +117 MPa，最大值 +117 MPa，发生在起楔位置。

图 5.2-42 为轧件横截面和纵截面典型位置的应力方向图。

从展宽段横截面与纵截面上的应力场分布特点，可以看出在轧件的中心，出现两向比较大拉应力，即横向应力 σ_x 与轴向应力 σ_z，另一向纵向应力 σ_y 一般为数值不大的拉应力或者压应力。所以在轧件中心出现比较大的平均应力 σ_m，与比较大的剪应力 τ_{xy}。而 τ_{xy} 在轧件每旋转一圈中，其值从 0 到 τ_{xy} 再到 0 反复两次，这是造成楔横轧轧件中心发生疏松乃至中心破坏的力学原因。

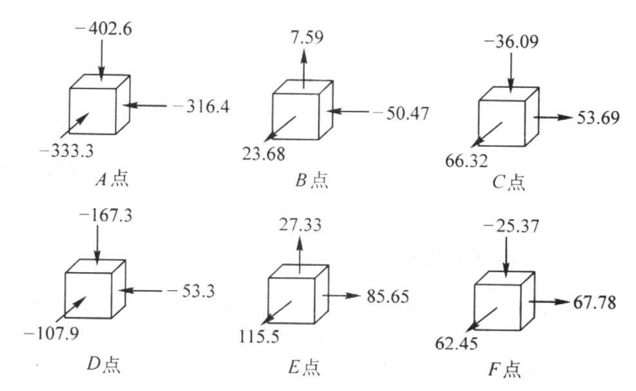
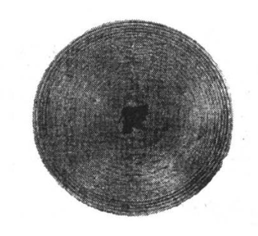


图 5.2-42　轧件典型位置应力方向图

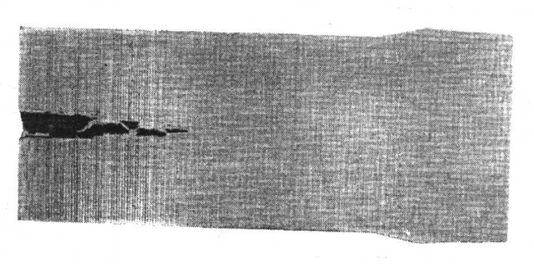
3.5　轧件心部缺陷产生机理

心部疏松和孔腔是楔横轧产品中容易出现的主要缺陷之一，它会削弱工件的材料强度，最终导致零件失效，图 5.2-43 显示了轧件出现心部孔腔的剖面图。虽然人们在生产中已经有一些办法控制疏松，但这一缺陷仍然是制约楔横轧工艺发展的一个主要障碍。

自从 Mannesmann 兄弟发现在圆棒料的锻造中会出现裂纹和孔隙以来，人们对 Mannesmann 效应的研究已有百年的历史。虽然楔横轧工艺与 Mannesmann 兄弟研究的成形过程不尽相同，但由于同样是旋转着的工件在轴对称方向受一对横向挤压力，类似的孔隙和裂纹常常在楔横轧产品中产生，所以通常也把楔横轧成形过程中出现的心部疏松和孔腔称为 Mannesmann 效应。



(a) 横剖面



(b) 纵剖面

图 5.2-43　轧件剖面照片



虽然 Mannesmann 效应已经被知道了一个多世纪，人们已经作了大量的工作试图明白其产生机理，但以往的研究多是基于模拟实验，简化的数学模型，滑移线方法和平面应变模型，受研究方法和手段的限制，还不能全面反映楔横轧复杂的三维变形本质，因而还没有一个被大家普遍接受的理论和解释。现代科学技术的发展特别是计算机速度的提高和有限元模拟技术的进步，为深入了解楔横轧的变形机理提供了新的解决方案。

本节在轧制实验的基础上用 ANSYS/LS－DYNA 有限元软件模拟两辊楔横轧轧制过程，研究楔横轧轧件心部缺陷产生的基本原因。

用于轧制实验的楔横轧模具和轧件形状如图 5.2-23 所示。模具顶圆直径为 600 mm，轧件原始直径 d_0 为 40 mm。轧件的被轧长度 L（模具展宽长度）为 140 mm。实验材料为 45 钢，采用高温管式炉加热，红外线测温，轧制温度控制在 1 050℃左右。

(1) 轧件心部应力应变特征

为了便于分析比较，模拟计算时采用的模具和轧件的尺寸、形状及工艺参数等与轧制实验时一致。

1) 轧件心部变形过程　通过有限元模拟结果，可以获得楔横轧整个轧制过程中轧件上任一点的时间历史曲线。现以轧制工艺参数为 $\alpha=15°$，$\beta=10°$，$\psi=55\%$时的工况为例说明轧件心部变形过程。取轧件心部某一点，其轴向位置如图 5.2-44 所示，$T=0$ 对应轧制起始时刻，$T=T_e$ 对应轧制终了时刻。在整体坐标系下其应力应变的时间历史曲线如图 5.2-45。从该图的应力应变曲线上可看出，在整个轧制过程中轧件心部的应力变化经历了三个阶段。

第一阶段（0～T_m 区间）可以称为主变形段。在本段中，轧件变形区在轧辊的压力作用下产生较大变形，径向压缩，金属主要向轴向流动，并有向横向流动的趋势。横截面上变形很不均匀，同一时刻纵向（轧辊方向）变形大于横向（垂直轧辊方向）变形。在应变上表现为一向大的拉应变和两向不同步的压应变。这种变形导致在横截面心部产生纵向压应力和横向拉应力。随着轧制过程的进行轴向和横向拉应力逐渐增加，其达到最大值的时间与该截面位置有关。纵向压应力则在达到极值之后，逐渐减小为零甚至变为不大的拉应力。在主变形段结束的时刻，该点所在的横截面基本成为轧后直径的圆截面，各项塑性应变值达到最大。该阶段轧件心部应力状态的特点是两向拉一向压。

第二阶段（T_m～T_e 区间）为精整段。在这一阶段轧辊对该截面的作用力不大，截面上除表层附近区域塑性应变值基本保持不变，轧件只发生一定的弹性变形。该截面上的等效塑性应变由外到内呈同心圆状分布，不同应变层之间几乎不再存在大的相互拉伸或压缩，第一与第二主应力变换方向，最大主应力指向轴向。该阶段应力状态的特点是两向拉一向为零或三向拉其中一向较小。

第三阶段（T_e～结束）为脱模段。轧制过程结束，轧件从模具中释放出来。失去轧辊的作用，纵向压应力迅速变为

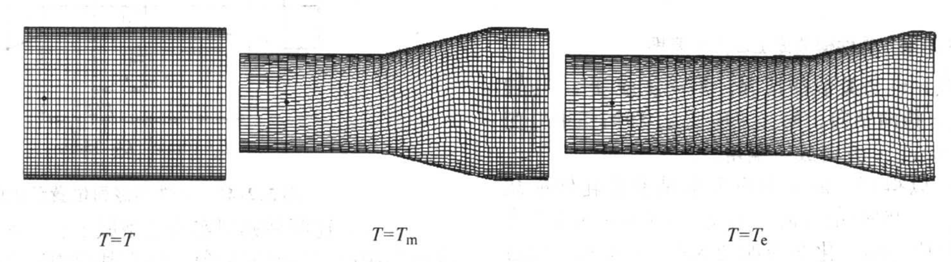


图 5.2-44　轧制过程中轧件取点轴向位置追踪示意图

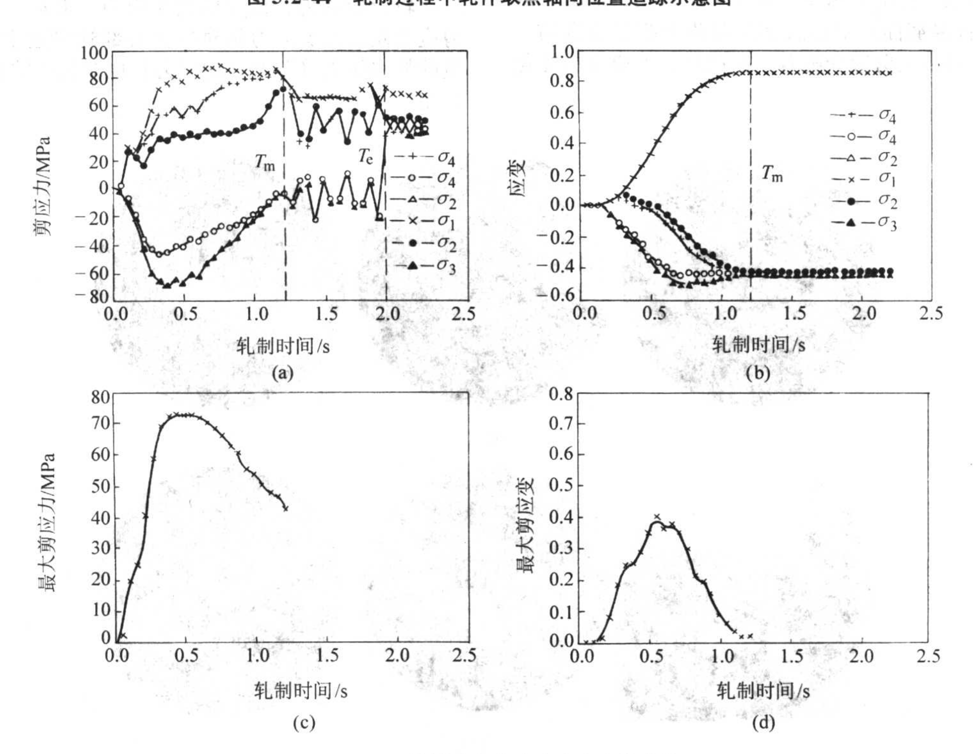


图 5.2-45　轧制过程中应力应变变化曲线



与横向拉应力值近似的纵向拉应力。由于模拟中将轧制过程简化为恒温绝热过程，所以这一阶段轧件心部保持不变的残余应力。由上述分析可得主变形段的应力应变行为对研究轧件中心的破坏情况有重要意义。

2）主变形段应力应变行为。在应力曲线图 5.2-45 上显示，第二主应力 σ_2 变化曲线与 σ_z 曲线基本重合。这是因为计算表明，在主变形段 σ_2 的方向始终指向轴向，主平面平行于轧件横截面，最大偏离角度不大于 5°。这意味着第一主应力 σ_1 与第三主应力 σ_3 是沿着轧件的横截面，指向径向。

另外，由于轧件非圆体积的影响，轧制力作用线偏离了上下轧辊的中心连线，第一主应力 σ_1 与 σ_x，第三主应力 σ_3 与 σ_y 分别有一不大的偏角。故曲线中 σ_1、σ_3 分别与 σ_x、σ_y 变化趋势一致，应力值接近。图 5.2-46 显示了轧件横截面上的应力状态。

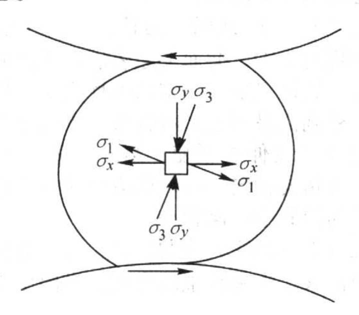


图 5.2-46　轧件横截面上应力示意图

对于应变曲线，也是类似的情况，第一主应变 ε_1 与轴向应变 ε_z 基本重合指向轴向，第二主应变 ε_2 和第三主应变 ε_3 分别沿横截面与 x、y 方向成一偏角。

由以上分析可以得到，最大剪应力也是沿着轧件横截面，指向 σ_1 和 σ_3 的 45°夹角方向。由 $\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 得到主变形段最大剪应力的变化曲线如图 5.2-45c 所示。而沿该横截面产生的最大剪应变由 $\gamma_{max} = \varepsilon_2 - \varepsilon_3$ 得到，如图 5.2-45d 所示。在轧件横截面的中心点存在着两个相互垂直的最大剪应变方向，其最大剪应变随着该截面最大剪应力的变化而变化。

由于楔横轧的轧件在成形过程中始终是以轧辊相反的方向绕自身轴线旋转，对于心部单元的某一方位来说其应力状态呈周期性的变化。沿着该方位，金属晶粒反复被滑移，拉开和压合。在这种方向交变的剪应力的反复作用下，晶格畸变会迅速增加，孕育着微观裂纹的发生和发展，横向拉应力则促使这种裂纹发展成为宏观断裂。

(2) 轧件心部疏松起因的研究

实验中一些轧件心部出现了明显的孔腔。本书选取其中的两种典型工况模型进行分析，说明应力应变状态对楔横轧件心部缺陷产生的影响。模具工艺参数如表 5.2-2 所示。

表 5.2-2　两种典型工况模型工艺参数

工　况	成形角 α	展宽角 β	断面收缩率 ψ
模型一	15°	10°	15%
模型二	15°	10°	55%

取轧件的三个典型截面，位置如图 5.2-47 所示。由图 5.2-48 显示的轧件横截面照片可以看到轧件的孔腔位于轧件的轴心，在轧件的轴向对称中心截面孔腔直径最大，沿轴线向两侧孔腔直径逐渐减小直到没有明显的宏观孔洞。从横截面孔腔的形状来看，轧件心部发生断裂时具有明显的方向性，是沿着相互垂直的两个方向开裂的。

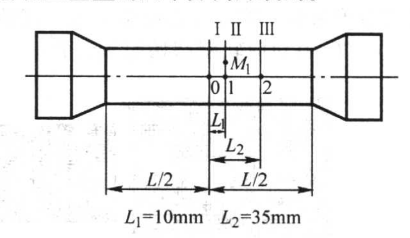


图 5.2-47　轧件横截面位置示意图

针对上述两种典型实验模型做了有限元模拟，并以相应截面的中心点为研究对象，追踪其应力应变的变化情况。通过比较分析认为，最大横向拉应力（即第一主应力）、最大剪应变及最大剪应力是对轧件心部缺陷起主导作用的因素，负的静水压力（正的平均应力）也对轧件的心部缺陷起重要作用。

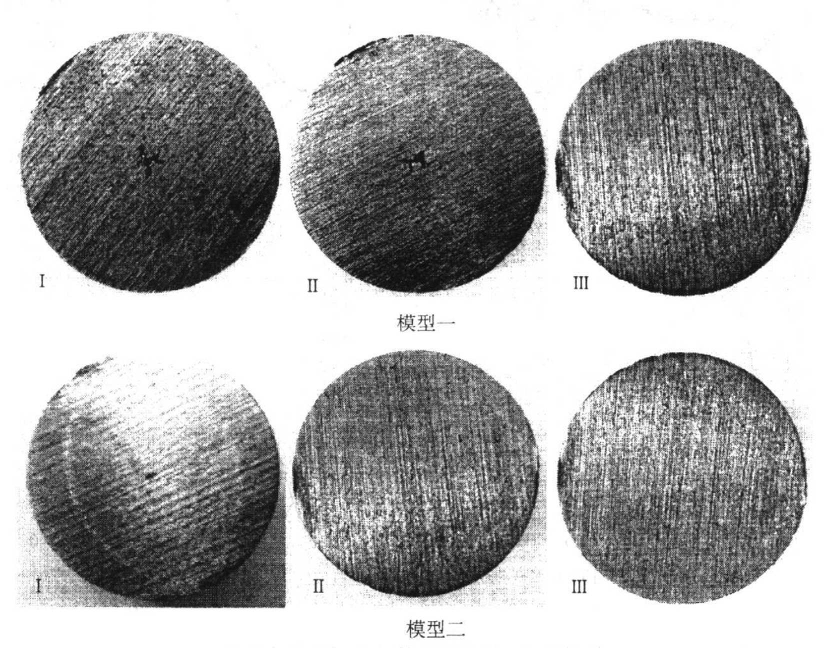


图 5.2-48　轧件横截面照片

为了更清楚的说明问题，只将最大横向拉应力、最大剪应变、最大剪应力单独显示在图 5.2-49 和图 5.2-50 中。由图 5.2-48 可见，轧件的三个中心点从左到右（相应的图 5.2-49 和图 5.2-50 从上到下），最大横向拉应力和最大剪应力有所降低但幅度不大，最大剪应变有显著降低；轧件心部孔腔则是从中心到两边由大到小直到没有。说明剪应变的存在及大小对轧件心部孔腔的形成与发展有重大影响作用。两种模型相比，模型一中最大横向拉应力数值显著偏高，剪应力稍小，剪应变明显偏小。两种模型的轧件中心都出现了孔腔，但模型一中的孔腔特点是直径尺寸大、沿轴向延伸较长，模型二直径小，沿轴向延伸短。说明横向拉应力的存在及大小对轧件心部孔腔的形成与发展同样有重大影响。横向拉应力促使微观裂纹或裂纹趋势发展为宏观断裂，并扩展成为孔腔，是破坏形成的充分条件。轧件心部横截面上严重的不均匀变形即大的剪应变的存在使金属晶粒反复被大幅度滑移，是形成韧性破坏的必要条件。横向拉应力和横截面最大剪应变与轧件的心部破坏都正相关，并且两者有交互作用，即当剪应变较大时，相对较小的横向拉应力即可造成轧件心部破坏；同样当横向拉应力较大时，存在相对较小的横截面剪应变也可引发轧件的心部破坏。在这里用了横截面上的剪应变而没有用等效应变，主要是考虑到等效应变反映的是变形的三维不均匀性，而中心疏松及孔洞的产生更多的是依赖横截面变形的不均匀性。

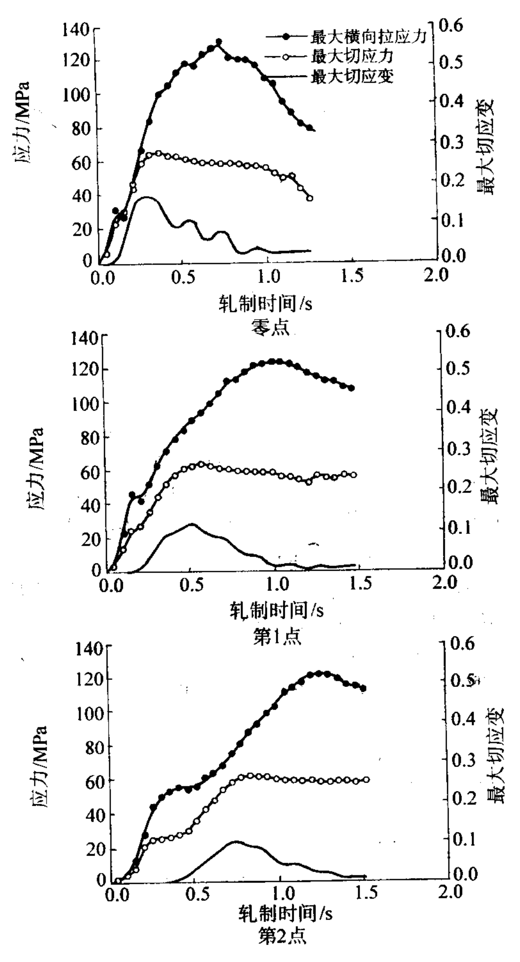


图 5.2-49 模型一的应力应变比较

模型一中轧件的断面收缩率较小，变形不易深入到轧件心部，横截面椭圆化趋势较大。在轧件心部产生高的横向拉应力和小的纵向压应力，使得剪应力与拉应力相比较小；模型二轧件的断面收缩率较大，变形渗透到轧件心部，金属横向流动趋势减小。横向拉应力的数值显著降低，纵向压应力显著提高，使得剪应力与拉应力数值相当。说明大断面收缩率情况下剪应力在心部破坏上所起的作用比在小断面收缩率时大。两种模型三个截面上的剪应力绝对值变化不大，但应力水平较高。在循环交变的变形特点下，较高水平的剪应力使轧件心部金属的晶格产生畸变，孕育着微观裂纹的发生和发展，是造成心部微观破坏的基础。

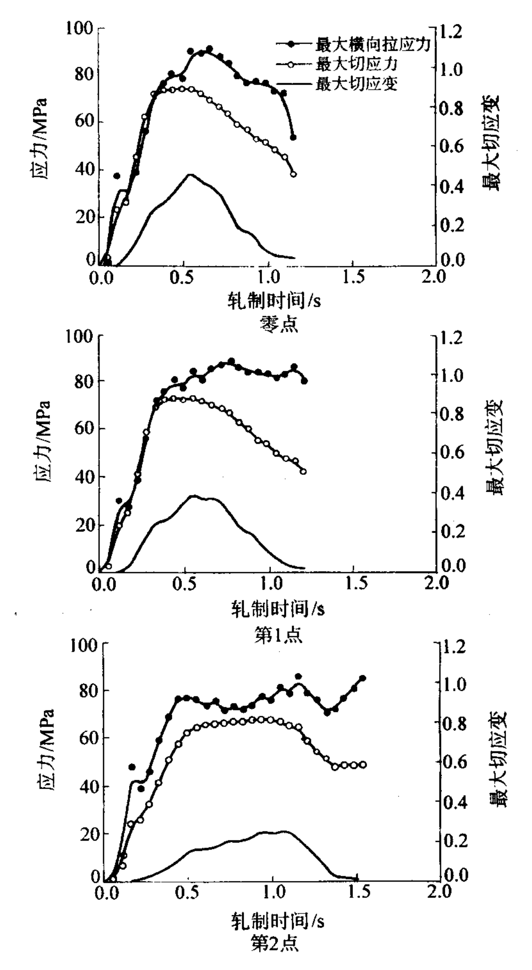


图 5.2-50 模型二的应力应变比较

静水压力在轧件心部破坏中也扮演了重要角色。大的静水压力可以改善材料塑性，抑制断裂的发生；负的静水压力则将降低材料的塑性，使其成为易发生断裂的薄弱区域。比较图 5.2-51 中轧件中心点 1 和二分之一半径点 M_1（位置如图 5.2-47 所示）的平均应力可以发现中心点 1 的平均应力值始终为正，并在加载过程中保持正向增加，处在以拉应力为主的负静水压力应力状态；而 M_1 点的平均应力值则在正负之间形成较大的波动。变形加载段以负值为主，峰值逐步增加。卸载段迅速减少并变成正值，M_1 点处在以压应力为主的正静水压力应力状态。所以心部是破坏的薄弱点。

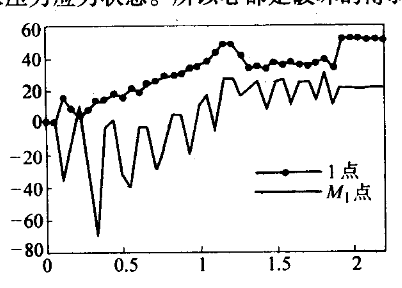


图 5.2-51 1 点和 M_1 点静水压力比较



4 轧制压力与力矩

4.1 模具与轧件接触面积

楔横轧轧制过程中，模具与轧件的接触面是空间曲面，在典型轧制展宽区的接触面由两部分组成，圆弧面 ABN 部分和直纹螺旋面 $BCMN$ 部分，如图 5.2-52 所示。

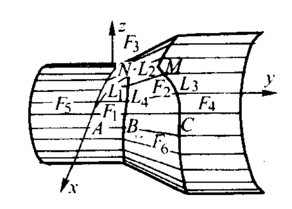


图 5.2-52 楔横轧轧制接触面

1）直纹螺旋面面积。直纹螺旋面 $BCMN$ 面是一个空间曲面，直接计算起来比较复杂，但可以看出，这个曲面在 y 轴方向的投影图的几何形状比较简单（图 5.2-53），由此可以较容易地计算出直纹螺旋面 $BCMN$ 面积在 y 轴方向的投影面积，进而近似计算出螺旋面 $BCMN$ 面积。

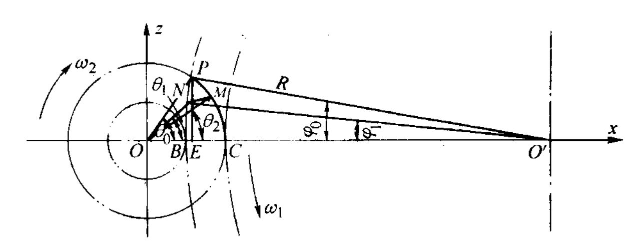


图 5.2-53 直纹螺旋面 $BCMN$ 在 y 轴方向的投影图

扇形 OCP 的面积为

$$S_{OCP}=\frac{1}{2}r_0^2\theta_0 \tag{5.2-69}$$

扇形 $O'PB$ 的面积为

$$S_{O'PB}=\frac{1}{2}R^2\varphi_0 \tag{5.2-70}$$

式中
$$\varphi_0=\arcsin\left(\frac{r_0}{R}\sin\theta_0\right) \tag{5.2-71}$$

△OEP 的面积为

$$S_{OEP}=\frac{1}{2}r_0^2\sin\theta_0\cos\theta_0 \tag{5.2-72}$$

△$O'EP$ 的面积为

$$S_{O'EP}=\frac{1}{2}R^2\sin\varphi_0\cos\varphi_0 \tag{5.2-73}$$

由此可以得到扇形 OCP 和扇形 $O'PB$ 重叠部分 BCP 的面积

$$F_{BCP}=F_{OCP}+F_{O'PE}-F_{OEP}-F_{O'PE} \tag{5.2-74}$$

将式（5.2-69）、式（5.2-70）、式（5.2-72）和式（5.2-73）代入上式得

$$F_{BCP}=\frac{1}{2}r_0^2(\theta_0-\sin\theta_0\cos\theta_0)+\frac{1}{2}R^2(\varphi_0-\sin\varphi_0\cos\varphi_0) \tag{5.2-75}$$

设点 M、P、N 在坐标系 xOz 内的坐标分别为 $M(x_M, z_M)$、$P(x_P,z_P)$、$N(x_N,z_N)$，可近似得到 MPN 的面积

$$F_{MPN}\approx\frac{1}{2}\begin{vmatrix}x_M & z_M & 1\\ x_P & z_P & 1\\ x_N & z_N & 1\end{vmatrix} \tag{5.2-76}$$

代入坐标值得

$$F_{MPN}\approx\frac{r_0}{2}\{r_0\sin(\theta_0-\theta_2)-r_1(\sin\theta_0-\sin\theta_0)-R[\sin(\theta_2+\varphi_1)-\sin\theta_2]+R[\sin(\theta_0+\varphi_1)-\sin\theta_0]\} \tag{5.2-77}$$

由图 5.2-53 可以看出，直纹螺旋面 $BCMN$ 面积在 y 轴方向的投影面积为

$$F_{2y}=F_{BCP}-F_{MPN}$$

将式（5.2-74）和式（5.2-77）代入上式得

$$F_{2y}\approx\frac{r_0^2}{2}[\theta_0-\sin\theta_0\cos\theta_0-\sin(\theta_0-\theta_2)]+\frac{1}{2}r_0r_1(\sin\theta_0-\sin\theta_2)\frac{1}{2}Rr_0[\sin(\theta_2+\varphi_1)-\sin\theta_2]-\frac{1}{2}Rr_0[\sin(\theta_0+\varphi_1)-\sin\theta_0]+\frac{1}{2}R^2(\varphi_0-\sin\varphi_0\cos\varphi_0) \tag{5.2-78}$$

直纹螺旋面 $BCMN$ 的参数方程也可写成如下切线方程形式

$$\frac{x-R-r_1}{\sin\alpha\sin\varphi}=\frac{y-R\cot\alpha-\pi r_k\tan\beta-R\tan\beta\varphi}{\cos\alpha}=\frac{z}{-\sin\alpha\sin\varphi}=t_m-\frac{R}{\sin\alpha} \tag{5.2-79}$$

把模具斜楔螺旋面纯滚动点的轨迹称作纯滚动迹线，其参数方程为

$$\begin{cases}x=R+r_1-R\cos\varphi\\ y=R_k\tan\beta\varphi+\pi r_k\tan\beta\\ z=R_k\sin\varphi\end{cases} \tag{5.2-80}$$

由此得

$$\frac{dx}{\cos\beta\sin\varphi}=\frac{dy}{\sin\beta}=\frac{dz}{\cos\beta\cos\varphi}=\frac{R_k d\varphi}{\cos\beta} \tag{5.2-81}$$

由式（5.2-79）和式（5.2-81）可得直纹螺旋面 $BCMN$ 内一点的两个切向向量为

$$\boldsymbol{p}=\{\sin\alpha\cos\varphi,\cos\alpha,-\sin\alpha\sin\varphi\}$$

$$\boldsymbol{q}=\{\cos\beta\mathrm{tg}\frac{\varphi}{2},\sin\beta,\cos\beta\}$$

由此可得其法向向量为

$$\boldsymbol{n}=\boldsymbol{p}\times\boldsymbol{q}=\begin{vmatrix}\boldsymbol{i} & \boldsymbol{j} & \boldsymbol{k}\\ \sin\alpha\cos\varphi & \cos\alpha & -\sin\alpha\sin\varphi\\ \cos\beta\sin\varphi & \sin\beta & \cos\beta\end{vmatrix}$$

整理后得

$$\boldsymbol{n}=\{\cos\alpha\cos\beta+\sin\alpha\sin\beta\sin\varphi,-\sin\alpha\cos\beta,\sin\alpha\sin\beta\cos\varphi-\cos\alpha\cos\beta\sin\varphi\} \tag{5.2-82}$$

由式（5.2-82）看出，直纹螺旋面 $BCMN$ 内逐点法向向量是随 φ 变化的，因此它的面积 F_2 与其在坐标轴 y 向投影面积 F_{2y} 的关系，不是简单的夹角余弦关系。但是根据楔横轧工艺的特点，模具半径较轧件半径大得多，为了近似求出轧制接触面积，这里做适当简化，近似认为直纹螺旋面 $BCMN$ 是一个平面，这样直纹螺旋面 $BCMN$ 内逐点的法向向量不变，取 $\varphi_0=\varphi_1/2$，写成单位法向量形式

$$\boldsymbol{n}=\{\cos\gamma_x,\cos\gamma_y,\cos\gamma_z\} \tag{5.2-83}$$

式中
$$\gamma_x=\arccos\left[\frac{\cos\alpha\cos\beta\cos\varphi_0+\sin\alpha\sin\beta\sin\varphi_0}{\sqrt{\sin^2\alpha+\cos^2\alpha\cos^2\beta}}\right]$$

$$\gamma_y=\arccos\left[\frac{-\sin\alpha\cos\beta}{\sqrt{\sin^2\alpha+\cos^2\alpha\cos^2\beta}}\right]$$

$$\gamma_z=\arccos\left[\frac{\sin\alpha\sin\beta\cos\varphi_0-\cos\alpha\cos\beta\sin\varphi_0}{\sqrt{\sin^2\alpha+\cos^2\alpha\cos^2\beta}}\right]$$

根据式（5.2-78）和式（5.2-83）求出接触面直纹螺旋面 $BCMN$ 的面积 F_2 为

$$F_2\approx\frac{1}{2\sin\gamma_y}\{r_0^2[\theta_0-\sin\theta_0\cos\theta_0-\sin(\theta_0-\theta_2)]+r_0r_1(\sin\theta_0-\sin\theta_2)Rr_0[\sin(\theta_2+\varphi_1)-\sin\theta_0]-$$

$$Rr_0[\sin(\theta_0+\varphi_1)-\sin\theta_0+R^2(\varphi_0-\sin\varphi_0\cos\varphi_0)\} \quad (5.2\text{-}84)$$

因此得到接触面直纹螺旋面 $BCMN$ 的面积 F_2 在各坐标平面的投影面积为

$$\begin{cases} F_{2x}=F_2\cos\gamma_x \\ F_{2y}=F_2\cos\gamma_y \\ F_{2z}=F_2\cos\gamma_z \end{cases} \quad (5.2\text{-}85)$$

2）圆弧面面积。圆弧形接触面 ABN 的面积 F_1 可由下式积分得（见图 5.2-52）

$$F_1=\int_0^{\varphi_1}[y_4(\varphi)-y_1(\varphi)]R\mathrm{d}\varphi \quad (5.2\text{-}86)$$

式中 $y_1(\varphi)$和 $y_4(\varphi)$分别为

$$\begin{cases} y_1(\varphi)=(r-r_1)\cot\alpha+r_k\tan\beta\theta \\ y_4(\varphi)=R_k\tan\beta\varphi+\pi r_k\tan\beta \end{cases} \quad (0\leqslant\theta\leqslant\theta_1)$$

式中 $r=\dfrac{R+r_1-R\cos\varphi}{\cos\theta}$

整理得

$$F_1\approx\int_0^{\varphi_1}(\pi r_k\tan\beta+r_1\cot\alpha+R_k\varphi\tan\beta)R\mathrm{d}\varphi-\cot\alpha\int_0^{\varphi_1}rR\mathrm{d}\varphi-r_k\tan\beta\int_0^{\varphi_1}\theta R\mathrm{d}\varphi \quad (5.2\text{-}87)$$

将式（5.2-87）适当进行简化，将弧线（面）$\widehat{BN}$简化为直线（平面）$\overline{BN}$，这时有

$$\begin{cases} r\approx\dfrac{\cos\varphi_0}{\cos(\theta+\varphi_0)}r_1 \\ R\mathrm{d}\varphi\approx d\left[\dfrac{r_1\sin\theta}{\cos(\theta+\varphi_0)}\right] \end{cases} \quad (5.2\text{-}88)$$

将式（5.2-88）代入式（5.2-87），设 $\gamma=\theta_1+\dfrac{\varphi_1}{2}$积分并整理后得

$$F_1\approx(\pi r_k\tan\beta+r_1\cot\alpha+\frac{1}{2}R_k\varphi_1\tan\beta)R\varphi_1-r_1r_k\tan\beta\cos\varphi_0(\theta_1\tan\gamma+\ln\cos\gamma-\ln\cos\varphi_0)-\frac{1}{2}r_1{}^2\cos^2\varphi_0[\tan\gamma\sec\gamma+\ln(\tan\gamma+\sec\gamma)-\tan\varphi_0\sec\varphi_0-\ln(\tan\varphi_0+\sec\varphi_0)] \quad (5.2\text{-}89)$$

由此可得出弧形接触面 ABN 在各坐标系平面的投影面积为

$$\begin{cases} F_{1x}\approx F_1\cos\varphi_0 \\ F_{1z}\approx F_1\sin\varphi_0 \end{cases} \quad (5.2\text{-}90)$$

4.2 数值计算数据

采用 ANSYS - LS/DYNA 有限元软件模拟楔横轧轧制过程。轧件材料为 45 钢，轧制温度在 1 050℃，模具脱空情况下的各种工艺参数模拟数值计算数据如图 5.2-54 ~ 图 5.2-57 所示。

1）展宽角。轧制过程中不同展宽角下力能参数的变化如图 5.2-54 所示。可以看出，在楔入段，各力能参数急剧增大，在楔入段结束时，达到最大值；展宽段各力能参数比较稳定。随着展宽角的增大，径向力和切向力增加，轴向力减小，轧制力矩增加。原因是展宽角增大使轧件变形区内金属的流动量增加，轴向压缩量增大，变形程度加大，轧件的轴向延伸受到的阻力增加，恶化了应力状态，轴向拉应力减小。另外，轧件沿径向方向发生塑性变形的轴部接触面积也随展宽角的增大而增加，所以径向力、切向力和轧制力矩均因展宽角的增大而增大。随着展宽角的增大，轧件沿轴向方向产生塑性变形的肩部面积减少，金属的轴向流动趋势减弱，轧件沿径向方向发生塑性变形的轴部接触面积增大，与金属流动方向相反的摩擦力增大，导致轴向力减小。所以轴向力随展宽角的增大而减小。

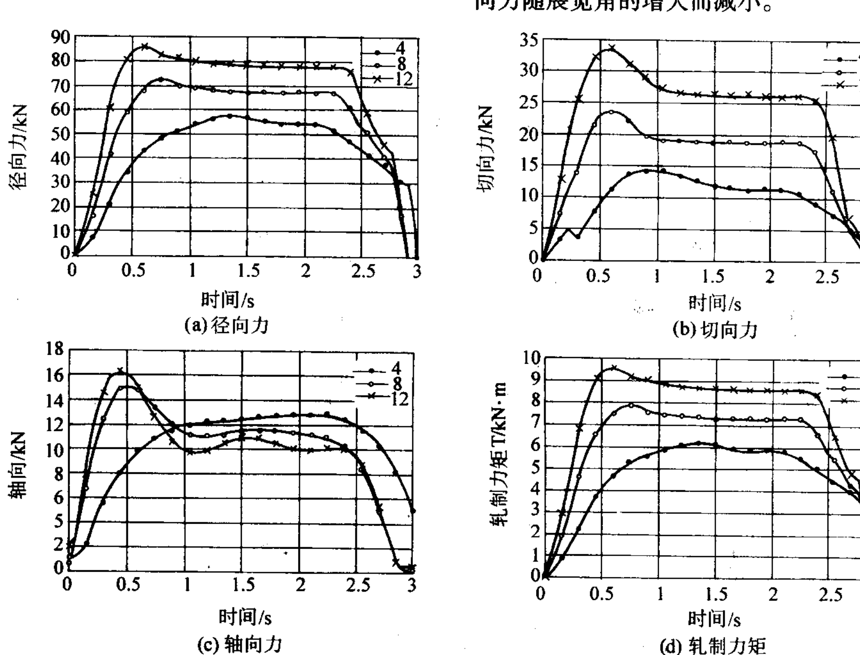


图 5.2-54 展宽角对力能参数影响

$\alpha=25°$，$\varphi=50\%$，$d_0=50$ mm

2）成形角。轧制过程中不同成形角下力能参数的变化如图 5.2-55 所示。由图 5.2-55 可以看出，在楔入段，各力能参数急剧增大，在楔入段结束时，达到最大值；展宽段各力能参数比较稳定。随着成形角的增大，径向力、切向力和轧制力矩减小，轴向力增加。因为成形角增大，使轧件轧制区金属的轴向流动量增加，径向流动量减小，金属轴向延伸阻力减小，金属产生塑性流动所需轧制压力减小。同时，轧制接触内轧件沿径向方向发生塑性变形的轴部接触面积减少，这两方面的综合作用使径向力、切向力和轧制力矩都减少。对轴向力而言，由于成形角的增大，作用于接触面上正

压力的轴向分力增加，轴向流动的金属量增加，所以轴向力增加。

3）断面收缩率。轧制过程中断面收缩率对力能参数的影响如图5.2-56所示。由图5.2-56可以看出，断面收缩率对力能参数的影响比较复杂，径向力、切向力和轧制力矩首先表现为随断面收缩率的增加而增大，当断面收缩率达到一定数值后，又随断面收缩率的增加而减小；轴向力随断面收缩率的增加而增大。

由楔横轧轧制过程中轴向压缩量 S_1 和斜面投影长度 S_0 关系式（5.2-91）可知，断面收缩率的增大

$$\begin{cases} S_1 = \pi(R_0 - \Delta H\xi)\tan\beta \\ S_0 = \Delta H/\tan\alpha \end{cases} \tag{5.2-91}$$

式中，$\xi = 0.5$；R_0 为轧件轧前半径；ΔH 为绝对压下量。

使轴向压缩量 S_1 减少，从而使压缩量 Z 值减小；另一方面，当由 $S_1 > S_0$ 向 $S_1 = S_0$ 方向过渡时，压下量 Z 又随断面收缩率的增大而增大。因此存在一个临界值 $\Delta H'$，当 $\Delta H < \Delta H'$ 时，径向力、切向力和轧制力矩随断面收缩率增大而增加；当 $\Delta H > \Delta H'$ 时随断面收缩率增大而减小。

4）轧件尺寸。轧件尺寸对力能参数的影响如图5.2-57所示。可以看出，随着轧件尺寸的增大，径向力、切向力、轴向力和轧制力矩均增加。因为随着轧件尺寸的增大，轧制接触面积显著增大，而接触面内单位压力变化远小于接触面积增大的变化，所以力能参数均增大。

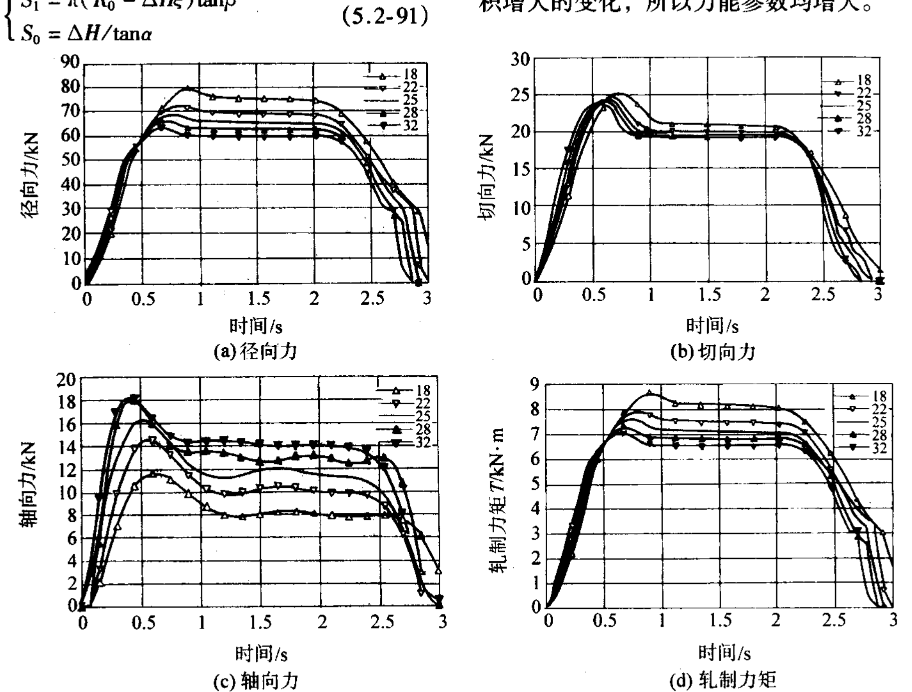


图5.2-55 成形角对力能参数影响

$\beta = 8°$，$\varphi = 50\%$，$d_0 = 50$ mm

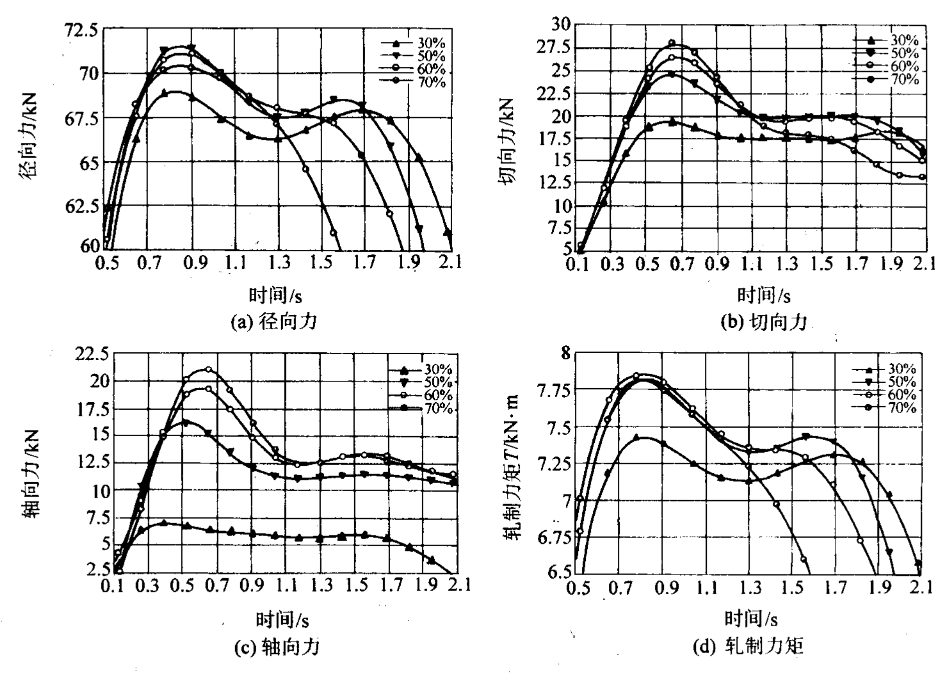
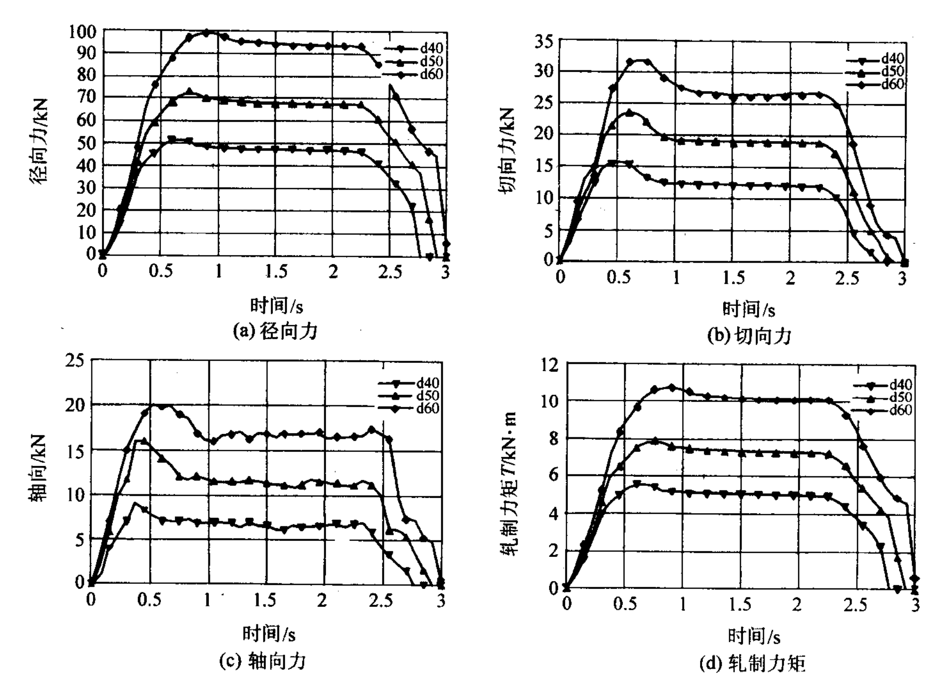


图5.2-56 断面收缩率对力能参数影响

$\alpha = 25°$，$\beta = 8°$，$d_0 = 50$ mm



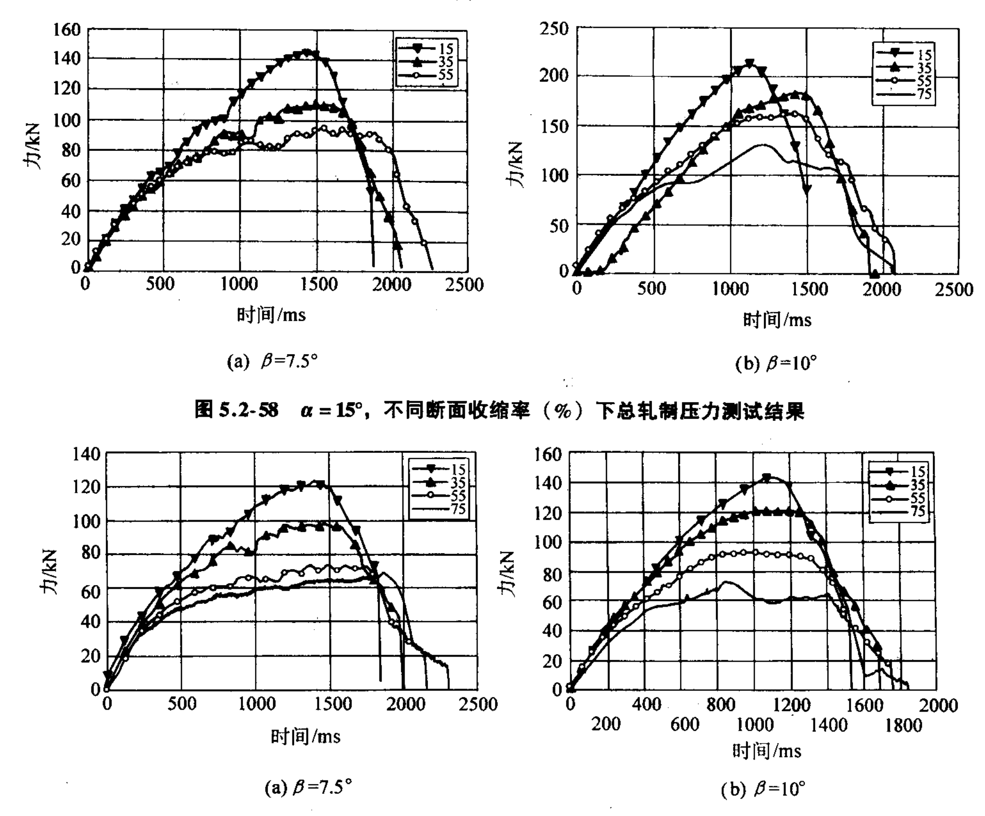
(a) 径向力　(b) 切向力　(c) 轴向力　(d) 轧制力矩

图 5.2-57 轧件尺寸对力能参数影响

$\alpha=25°$，$\beta=8°$，$\varphi=50\%$

4.3 轧制实测数据

采用计算机数据采集测试系统，在操作侧和传动侧上轴承座上端面与压下螺钉之间安装压力传感器测量两侧轧制压力大小，两侧轧制压力总和即为总轧制压力。在上下万向传动轴上安装滑环，测得上下两轧辊的力矩。轧件材料为45钢，坯料直径为ϕ40 mm，轧制温度在1 100℃左右。模具不脱空情况下的轧制压力测试数据如图5.2-58和图5.2-59所示。



(a) β=7.5°　(b) β=10°

图 5.2-58 $\alpha=15°$，不同断面收缩率（%）下总轧制压力测试结果

(a) β=7.5°　(b) β=10°

图 5.2-59 $\alpha=20°$，不同断面收缩率（%）下总轧制压力测试结果

由图5.2-58和图5.2-59可知，随着断面收缩率增大，轧制压力减小，而且断面收缩率越小，最大轧制压力持续时间越短。因为随着轧件展宽的进行，辊面与轧件已轧部分接触面积不断变化，轧制压力不仅包括轧制变形区产生的轧制压力，还包括辊面与已轧部分接触产生的附加轧制压力。随着断面收缩率的增大，金属变形渗透到轧件中心，轧制金属

轴向流动越容易，横向变形较小，轧件已轧部分与辊面接触面积变小，附加轧制压力减小，轧制压力主要表现在轧制变形区。因此轧制压力较小。当轧件断面收缩率为55%时，轧制压力平坦段明显，最大轧制压力出现在平坦段且基本不变，因此，附加轧制压力很小几乎为零，轧制压力主要表现在轧制接触区。为了减小小断面收缩率（通常50%以下）下附加轧制压力，在模具设计时将模具辊面脱空，这样已轧部分就不与辊面接触，因而可以显著减小轧制压力。

由图5.2-58和图5.2-59可知，在成形角相同情况下，随着展宽角的增大，对应断面收缩率下轧制压力增大；在展宽角相同情况下，随着成形角的增大，对应断面收缩率下轧制压力减小。

轧制力矩测试数据如图5.2-60所示。图中 M_1 为下轧辊轧制力矩，M_2 为上轧辊轧制力矩。分析图5.2-60可知，在成形角和展宽角相同工艺参数下，随着断面收缩率的增大，轧制力矩减小；在成形角和断面收缩率相同工艺参数下，随着展宽角的增大，轧制力矩增大。其影响原因与轧制压力类似。

4.4 影响因素综合

通过上述对楔横轧力能参数影响因素的实验与理论分析可知，各影响因素在不同程度上影响着楔横轧的力能参数。为了得到各影响因素对楔横轧力能参数的影响主次，引入无量纲量影响因子 λ 和影响系数 η，且定义为

$$\begin{cases}\lambda = \dfrac{X_i}{X_0} \\ \eta = \dfrac{Y_i}{Y_0}\end{cases} \tag{5.2-92}$$

式中，X_i 为影响因素值；X_0 为影响因素初值；Y_i 为力能参数值；Y_0 为力能参数初值。

综合上述分析结果，得到影响因子对力能参数影响如图5.2-61所示，并得到如下结论。

1）影响楔横轧力能参数的四个因素中，轧件尺寸影响最大，其次是成形角和展宽角，而且成形角比展宽角影响较大，断面收缩率对力能参数影响较小。

2）对于轧制压力和轧制力矩而言，随轧件尺寸和展宽角的增大而增大，随成形角的增大而减小。断面收缩率对其影响表现为在模具辊面脱空情况下随断面收缩率的增加而增大，当断面收缩率达到一定数值后，又随断面收缩率的增加而减小；在模具辊面不脱空情况下随断面收缩率的增加而减小。轴向力随轧件尺寸、成形角和断面收缩率的增加而增大；随展宽角的增大而减小。

3）小断面收缩率（通常50%以下）下模具辊面脱空，可以显著减小附加轧制压力。

5 模具设计

5.1 模具设计的一般原则

在设计楔横轧模具时，一般应遵循下述四个原则或者条件。

（1）对称原则

楔横轧模具上的左右两条斜楔，在工艺上希望完全对称。这样，在轧制过程中模具两边作用于轧件两边的 x、y、z 三个方向力是对称的，因而轧件不会由于轴向力不等而串动，也不会由于轧件两边转速不一致而扭曲。

如果轴类件本身在长度上就是对称的（图5.2-62a），那么只要在制造上与工艺调整上加以注意，就自然地满足这一对称轧制原则。

但是，多数轴类件在长度上是不对称的（图5.2-62b），为了使作用于轧件两边的力符合对称原则，有四种解决办法。

1）成对轧制。将不对称的两个轴类件相对在一起轧制。这种办法不仅将非对称轴类件变为完全对称的轧制。并且使轧机的生产率提高一倍，但对某些长轴类件，往往受到模具尺寸的限制而无法采用。

2）分段对称轧制。将非对称轴分段用对称楔轧制。

3）长棒料预轧楔轧制。用预轧楔的方法将非对称轴类件变为对称轧制。

4）对称力轧制。可将左右两条斜楔的工艺参数（成形角 α 与展宽角 β）采取不等数值，使其作用于轧件的力，尤其是轴向力尽可能相等的办法。

（2）旋转条件

设计楔横轧模具时，轧件在模具孔型的带动下能正常地旋转，是楔横轧必需的先决条件。

楔横轧轧件的整体旋转条件，由于问题比较复杂，还写不出判别式。建议用最不利截面的旋转条件判别式进行判断，其判别式为

$$\tan\alpha\tan\beta \leqslant \frac{d_1\mu^2}{\pi d_k\left(1+\dfrac{d_1}{D_1}\right)} \tag{5.2-93}$$

式中，d_1 为轧件轧后的直径；D_1 为轧辊上模具的棒顶直径；d_k 为轧件的滚动直径。

从旋转条件判别式（5.2-93）可以看出：

1）模具与轧件间的摩擦因数 μ 越大，旋转条件越好，而且是平方关系的影响，所以增加摩擦因数 μ 是保证旋转条件最重要最有效的因素，为此，在楔横轧模具的入口处和斜楔面上均刻有平行于轴线刻痕，这样做可以把热楔横轧的摩擦因数 μ 从0.2～0.3提高0.35～0.6；

2）模具的成形角 α、展宽角 β、轧件的轧后直径与模具楔顶直径之比 d_1/D_1 越小，旋转条件越好，但这些参数还受其他重要条件的限制，调整余地不很大。

（3）缩颈条件

在设计楔横轧模具时，应满足轧件不因轴向力过大将轧件拉细这个条件。轧件不被轴向力 P_z 拉细的判别条件为

$$2P_z < \frac{1}{4}\pi d_1^{\ 2}\sigma$$

或

$$P < \frac{\pi d_1^{\ 2}\sigma}{8\sin\alpha} \tag{5.2-94}$$

式中，σ 为轧件材料的变形阻力。

从式（5.2-94）可以看出：当轧件的材料、轧制温度及轧后直径 d_1 等确定后，轧件是否会拉细，主要决定于成形角 α 的大小，α 角越大越易拉细。

当断面收缩率比较大时，容易产生拉细现象，故成形角 α 应取小的数值。

（4）疏松条件

楔横轧的轧件，由于金属纤维沿零件的外形连续分布，晶粒细化等，使轧后零件的质量得到提高。

实践与理论都说明：横轧时，圆形毛坯在连贯转动中径向小变形量压缩时，毛坯除轴向延伸处，径向也产生扩展，因而在毛坯的心部产生拉应力。当毛坯旋转时，若轴向阻力过大；毛坯横向扩展积累，心部的拉应力增加，当达到材料强度极限时，心部就出现超过允许级别的疏松甚至空腔，这是不允许的。

(a) $\alpha=25°$, $\beta=5°$, $\varphi=35\%$

(b) $\alpha=25°$, $\beta=5°$, $\varphi=55\%$

(c) $\alpha=25°$, $\beta=5°$, $\varphi=75\%$

(d) $\alpha=25°$, $\beta=7.5°$, $\varphi=35\%$

(e) $\alpha=25°$, $\beta=7.5°$, $\varphi=55\%$

(f) $\alpha=25°$, $\beta=7.5°$, $\varphi=75\%$

(g) $\alpha=25°$, $\beta=10°$, $\varphi=35\%$

(h) $\alpha=25°$, $\beta=10°$, $\varphi=55\%$

(i) $\alpha=25°$, $\beta=10°$, $\varphi=75\%$

图 5.2-60 不同工艺参数下轧制力矩测试结果



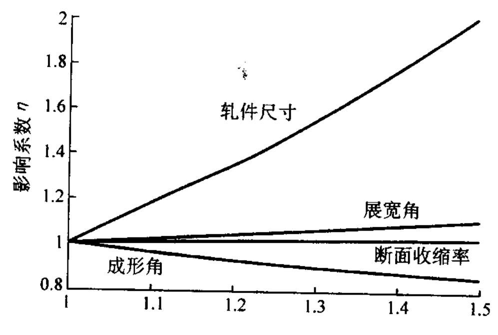


图 5.2-61 影响因子对力能参数影响

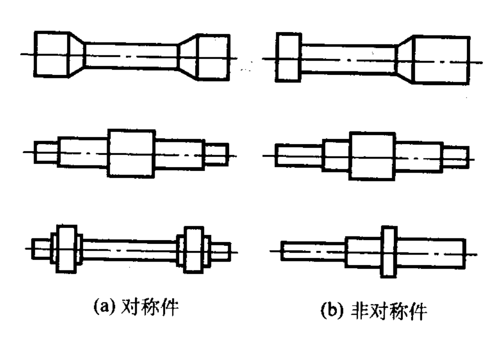


图 5.2-62 楔横轧轴类件

所以，在设计楔横轧模具时，为避免这种现象的出现，应作如下考虑。

1）断面收缩率小时，容易产生疏松。因为 ψ 小时，变形不易透入中心，多是表面变形，故轴向变形小而横向变形大，形成较大的心部拉应力。

2）成形角小时，容易生产疏松。因为 α 小时，斜楔给毛坯的轴向拉力小，轴向变形小，易造成较大的横向变形，形成较大的心部拉应力。

3）展宽角过小时，相当于径向压下量过小与同一位置拉压次数增加，容易产生横向变形及心部的较大拉应力。当展宽角过大（特别是在 ψ 较小）时毛坯表面金属不容易擀出去，这部分多余金属在孔型顶面反复揉搓下，毛坯心部产生较大的拉力。以上两种情况都容易生产疏松。

5.2 工艺参数的确定

（1）断面收缩率 ψ

断面收缩率（又称断面压缩率）ψ，是楔横轧中一个基本工艺参数。

断面收缩率 ψ 为轧件前面积 F_0 减去轧后面积 F_1 与轧前面积之比，即

$$\psi=\frac{F_0-F_1}{F_0}=\frac{d_0^2-d_1^2}{d_1^2}=1-\left(\frac{d_1}{d_0}\right)^2 \quad (5.2\text{-}95)$$

式中，d_0 为轧件轧前直径；d_1 为轧件轧后直径。

楔横轧一次的断面收缩率 ψ 一般应小于 75%，否则容易产生轧件的不旋转，螺旋缩颈甚至拉断等问题。如果轴类件产品直径相差很大，断面收缩率 ψ 大于 75%，一般采用在同一轧辊模具上两次楔入轧制，即每次楔入轧制的压缩率小于 75%，两次总压缩率大于 75% 的方法；在个别情况下，可采用局部堆积（毛坯直径增大）轧制的方法使 ψ 大于 75%。

需要指出的是，断面收缩率 ψ 小于 35% 时，若工艺设计参数选择不当，不但轧制尺寸精度不易保证，而且容易出现轧件中心疏松等缺陷。因为 ψ 过小时，金属只产生表面变形，轴向没有或基本没有变形，多余的金属在模具间反复揉搓，中心产生拉应力与反复剪应力使中心破坏所致。对于小的断面收缩率 ψ，为避免中心疏松应该选择小的展宽角与大的成形角。

所以说，楔横轧最有利的断面收缩率为：$\psi=50\%\sim65\%$。在这个范围的断面收缩率，可以选择较大展宽角轧制。

（2）成形角 α

成形角 α 是楔横轧模具设计两个最重要、最基本的工艺设计参数之一。

成形角 α 对轧件的旋转条件、缩颈条件以及轧制压力与力矩都有显著的影响。一般情况下，α 角越大、β 角越大、旋转条件越差，容易产生缩颈，但中心疏松条件改善。

根据理论与实践，成形角 α 大多在以下范围内选择

$$18°\leqslant\alpha\leqslant34°$$

断面收缩率 ψ 不同时，成形角 α 应选择不同的数值。理论与实践告诉我们，一般情况下，ψ 越大，越容易产生缩颈和不旋转问题，而不易发生中心疏松，故 α 应选择较小值。断面收缩率 ψ 与成形角 α 的关系，建议按表 5.2-3 所列范围内选择。

表 5.2-3 断面收缩率与成形角的关系

断面收缩率 ψ /%	成形角 α /(°)	断面收缩率 ψ /%	成形角 α /(°)
80～70	18～24	60～50	26～32
70～60	22～30	<50	>28

如图 5.2-63 所示，在模具成形面上还可以作如下考虑。

1）在楔顶尖角处设计一个圆弧 R_0 此处 R 越大，应力集中减轻，越不易产生螺旋缩颈。但 R 不宜过大，否则容易产生金属轴向不容易变形出现的疏松。此外模具在生产中楔顶尖角处容易磨损，磨损后的夹角实际就相当于加大 R。

2）在楔斜面上设计成双斜面，其中 $\alpha_1>\alpha$，$\alpha_2<\alpha$。由于 $\alpha_2<\alpha$ 不容易产生缩颈，又由于 $\alpha_1>\alpha$ 金属容易实现轴向流动双重好处。但在加工制造上增加了难度。对于二次楔入轧制，由于疏松倾向增加，在选择成形角时，应取大的数值。

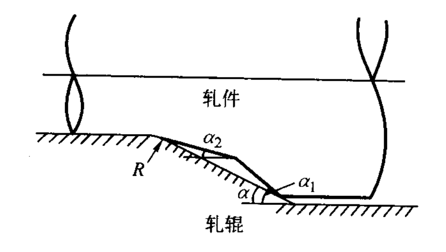


图 5.2-63 模具成形面形状

（3）展宽角 β

展宽角 β 与成形角 α 一样，是楔横轧模具设计中最重要、最基本工艺设计参数。

展宽角 β 对轧件的旋转条件、疏松条件、缩颈条件以及轧制压力与力矩都有显著的影响。一般情况下，β 角越大，旋转条件越差，容易产生螺旋缩颈，轧制压力与力矩增加，但中心疏松条件改善。

根据理论与实践，展宽角大多在以下范围内选择

$$4°\leqslant\beta\leqslant12°$$

为了减少模具的长度，在模具设计时在允许的条件下应尽可能选取较大的 β 角。

断面收缩率 ψ 对展宽角 β 的影响比较复杂，一般情况是：当 $\psi>70\%$ 时，应该选择较小的 β 值，否则容易产生缩



颈；当 $\psi<35\%$时，也应该选择较小的 β 值，否则容易产生疏松。

断面收缩率 ψ 与展宽角 β 的关系，建议按表 5.2-4 选择。

表 5.2-4 断面收缩率与展宽角的关系

断面收缩率 ψ /%	展宽角 β /(°)	断面收缩率 ψ /%	展宽角 β /(°)
80~70	4~8	50~40	5~9
70~60	5~9	<40	<8
60~50	7~12		

需要指出，对于塑性较差的材料，以及工艺上需要较低温度轧制的碳钢或低合金钢，轧制较小直径的轧件，由于温降快，塑性较差时，在选择展宽角时，应选择较小数值。

5.3 对称轴类件的模具设计

将楔横轧模具的设计分为两类：对称轴类件（图 5.2-62a）的模具设计；非对称轴类件（图 5.2-62b）的模具设计。所谓对称轴类件，是指在轴线上存在一根对称垂直轴线的各种轴，否则为非对称轴类件。

显然，对称轴类件的模具上孔型的主要特点是：相对于轧辊轴线的某根垂线的两边的斜楔线，是完全对称的。

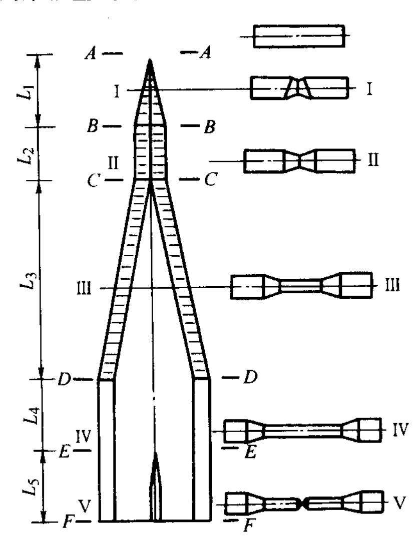


图 5.2-64 楔横轧典型模具的区段图

这种对称轴类件的典型模具设计图如图 5.2-64 所示，分为五个区段：楔入段、楔入平整段、展宽段、精整段以及剪切段。每一段的作用与设计计算说明如下。

(1) 楔入段（A—B）

楔入段模具孔型的楔尖高度，按阿基米德螺线，由零（模具基圆）增至楔顶高 h 处。

楔入段的作用是实现轧件的咬入与旋转，并将轧件压成由浅入深的 V 形槽，其最深处为 $\Delta r=r_0-r_1$。如图 5.2-64 中的Ⅰ—Ⅰ截面所示。

楔顶高 h 与 Δr 关系为

$$h=\Delta r+\delta$$

式中 δ 为轧件外径至轧辊基圆的距离，其数值一般为：$\delta=0.3\sim2$ mm。

楔入段的长度 L_1 用下式进行计算

$$L_1=h\cot\alpha\cot\beta \tag{5.2-95}$$

楔入段成形角 α 与展宽角 β 的选择，主要考虑轧件的旋转条件。为了简化模具的设计与加工，常常让楔入段的成形角 α 与展宽角 β 等于展宽段的数值。

为了防止楔入段轧件不旋转，除在斜楔面上刻痕外还需要在楔入段开始处的前后的基圆面上刻平行于轧辊轴线的刻痕，如图 5.2-64 所示。

(2) 楔入平整段（B—C）

楔入平整段模具孔型形状保持不变，即此段的楔尖高 h 不变，展宽角 $\beta=0$。

楔入平整段的作用是将轧件在整周上全部轧成深度为 Δr 的 V 形环槽，如图 5.2-64 所示的Ⅱ—Ⅱ截面。其目的为改善展宽段开始时的塑性变形。

楔入平整段的长度 L_2 用下式进行计算

$$L_2>\frac{\pi}{2}d_k \tag{5.2-96}$$

一般取 $L_2=0.6\pi d_k$ 即保证在二辊楔横轧机上轧件滚动半圈以上。

实践已经证明，在模具设计中取消这一楔入平整段，对轧制过程的稳定与产品的质量均无多大影响。取消楔入平整段，不仅可以减少模具的长度，而且简化了机械加工。

楔入平整段与展宽段交接处（图 5.2-64 的 C 处），由于楔入平整段的展宽角 $\beta=0$，而展宽段的展宽角 β 为某一角度，若不将模具在此交接处分开是很不好加工的。

(3) 展宽段（C—D）

展宽段模具孔型的楔顶高度不变，但楔顶面与楔底的宽度由窄变宽。

展宽段是楔横轧模具完成变形的主要区段，轧件直径压缩，长度延伸这一主要变形是在这里完成的，轧件的这段的形状如图 5.2-64Ⅲ—Ⅲ截面所示。

楔横轧的主要工艺设计参数 α 与 β，主要依据这一段的断面收缩率 ψ 等因素确定，模具的长度与轧辊的直径大小也主要受它的影响。

展宽段的长度 L_3 用下式进行计算

$$L_3=\frac{1}{2}l_1\cot\beta \tag{5.2-97}$$

式中，l_1 为轧件轧后以 d_1 为直径部分的长度（见图 5.2-64）。

楔横轧的轧制压力与力矩，在五个区段上是不相同的。在一般情况下，展宽段的压力与力矩在这些区段中是最大的。

(4) 精整段（D—E）

精整段模具孔型的楔顶高与楔顶面与楔底的宽度都不变化，即展宽角 $\beta=0$。

精整段的作用有两个：一是将轧件在整周上全部轧成所需的尺寸；二是将轧件的全部尺寸精度与表面粗糙度精整后，达到产品的最终要求。轧件在这段的形状如图 5.2-64 的Ⅳ—Ⅳ截面所示。

精整段的长度 L_4 用下式进行计算

$$L_4>\frac{\pi}{2}d_k \tag{5.2-98}$$

一般取 $L_4=0.6\pi d_k$，即保证在二辊楔横轧机上轧件滚动半圈以上。

由于轧机机座是一个弹性体，轧制时轧制压力大小是变化的，所以两个轧辊的轴心间距离、两个模具间的距离是变化的。轧件在精整段中有一定的压力，当轧件完成精整并离开模具的一瞬间，由于压力突然消失，两个轧辊的轴心线将突然靠拢，将给轧件表面留下轴向压痕。为此，需在精整段的最后部分，设计一个卸载段。

卸载段的形状如图 5.2-65 所示，从楔顶面开始按阿基米德螺线（ab）其半径由 R_1 变为 R_2，$R_1-R_2=\delta$，此 δ 量为半径减小值，它应大于机座精整结束时的弹跳值。



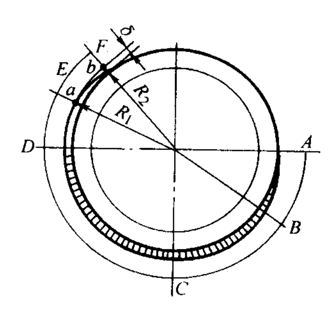


图 5.2-65　楔横轧模具的卸载段

AB—楔入段；*BC*—楔入平整段；*CD*—展宽段；

DE—精整段；*EF*—卸载段

(5) 剪切段 (*E*—*F*)

剪切段的作用是将轧好的轧件切断。既可以把切刀放在中间把轧件一切为二或更多件，也可以放在两头，切去多余的料头。因切刀的寿命低，切刀多单独做好再固定在模具上。剪切段都放在孔型的最后，与卸载重合。

5.4　非对称轴类件的模具设计

对称轧制是楔横轧模具设计的基本原则之一。对于非对称轴类件的轧制，在模具设计上应该使其实现对称轧制这一原则，或者使其满足对称力轧制原则。

下面将分别介绍四种非对称轴类件使其实现对称轧制的思路及其方法。

(1) 成对轧制

非对称轴类件采用两个轧件对起来进行轧制，这是楔横轧模具设计中经常采用、非常有效的方法。这样做还可使轧机的生产由每转一个提高到每转二个，并节约了料头金属。

图 5.2-66 所示的为拖拉机齿轮轴，是非对称轴，采用成对轧制后，就成为完全对称的轧制。

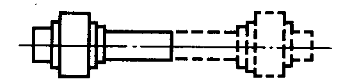


图 5.2-66　拖拉机齿轮轴毛坯

非对称轴采用成对轧制的问题是，需增加模具的长度（几乎为一倍），这对某些较长的非对称轴件，由于受轧辊直径的限制不能实现对称轧制，换句话说，一般情况下成对轧制适合于较短的非对称轴类件。

非对称轴类件成对轧制，存在如何对轧的问题。例如设计楔横轧喷油嘴模具时，存在大头放在两边（图 5.2-67a）还是大头放在中间（图 5.2-67b）这一问题。

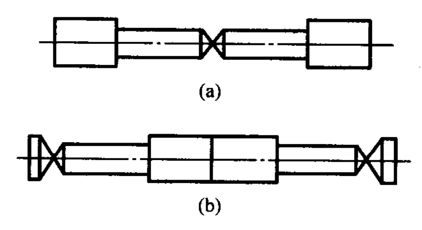
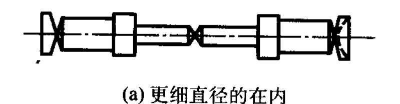


图 5.2-67　成对轧制喷油嘴的两个方案

显然，大头在中间进行对轧的方案存在两个缺点：一是存在两个多余金属料头，二是当料头切除后，细直径部已无导板支撑轴件容易弯曲。大头在两端进行对轧的方案就不存在上述缺点，但属于内直角台阶轧制，需要设计特殊的轧齐曲线模具（见本章 2.4 节）。

对于中间粗、两头细的非对称轴类件，也存在如何对轧的问题。从节约料头金属这一观点，应该是更细直径的在内（图 5.2-68a），这样对轧时，轧件两头的凹陷小，切除的料头小。相反，若更细的直径在外（图 5.2-68b），对轧时，轧件两头的凹陷大，切除的料头多。但是，当更细直径外的断面收缩率大于 75% 时，即需要两次楔入轧制时，若更细直径在内，由于两次轧齐容易出现问题，故大多将更细直径放在外轧制。当然，这样轧制切除的料头要多一些。



(a) 更细直径的在内



(b) 更细直径的在外

图 5.2-68　中间粗两头细非对称轴类件成对轧制方案

同样，对于中间粗两头细的非对称轴类件，若两头的细直径一样大时，应该将短头放在两头，这样进行对轧的轧件头部凹陷小，切除的料头少。

(2) 分段对称楔轧制

非对称轴类件，可采用分段对称楔的方法进行轧制。对称楔轧制，由于两边的作用力完全对称，轧制稳定可靠。

图 5.2-69 为非对称轴用对称楔轧制的例子。首先在模具的 *A*—*B* 段，用对称楔将轧件的右边 d_0 一次压到 d_1 和所需的长度 l_1；然后在模具的 *B*—*C* 段，用另一对称楔将轧件的左边 d_0 一次压到 d_2 和所需的长 l_2；最后在模具的 *C*—*D* 段，用一对称剪切楔完成非对称轴的全部对称楔轧制。

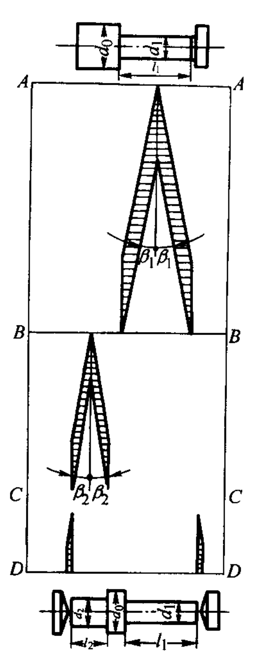


图 5.2-69　非对称轴的对称楔轧制模具图

分段对称楔轧制需要注意解决的问题是分段轧制之间的轴向定位以及增加轧齐部位等。

(3) 对称力轧制

某些非对称轴类件，既不能采用成对轧制，又不能采用分段对称楔轧制时，只可采用非对称楔轧制，但模具设计上应尽量使其为对称力轧制。

图 5.2-70 为楔横轧麻花钻头锥柄部分。为节约高速钢，柄部用中碳钢与刃部高速钢先焊接，后轧扭麻花刃部，最后楔横轧锥柄部，所以只能进行非对称楔轧制。

图 5.2-70 为楔横轧麻花钻头锥柄的模具孔型图。在模具上，由于左边的斜楔越向左移动断面收缩率 ψ 越大，而



右边斜楔越向右移动断面收缩率 ψ 越小，为实现对称力轧制，故采用 $\beta_1 < \beta_2$ 的不对称楔轧制。

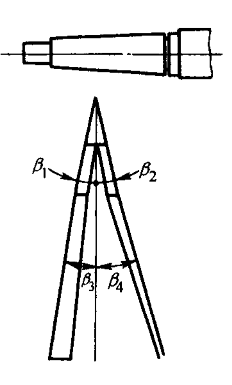


图 5.2-70 非对称楔轧制麻花钻头锥柄

当然，对这种锥形轴，即 ψ 连续变化的轴，展宽角 β 也应该设计成连续变化的，这需要数控或仿形机床进行加工。但这里仍用一般车床加工，展宽角用了四个。在设计上采用：$\beta_3 < \beta_1$ 和 $\beta_4 > \beta_2$。除采用 β 角不等外，还采用两边成形角 α 不等的办法，使两边的力对称。

(4) 预轧楔轧制

预轧楔轧制是一种有效地将非对称轴的轧制变为对称楔轧制或者接近对称楔轧制的方法。

这种预轧楔轧制是以长棒料轧制为基础的。图 5.2-71 所示，为长棒料轧制中间粗两头细的非对称轴模具图。

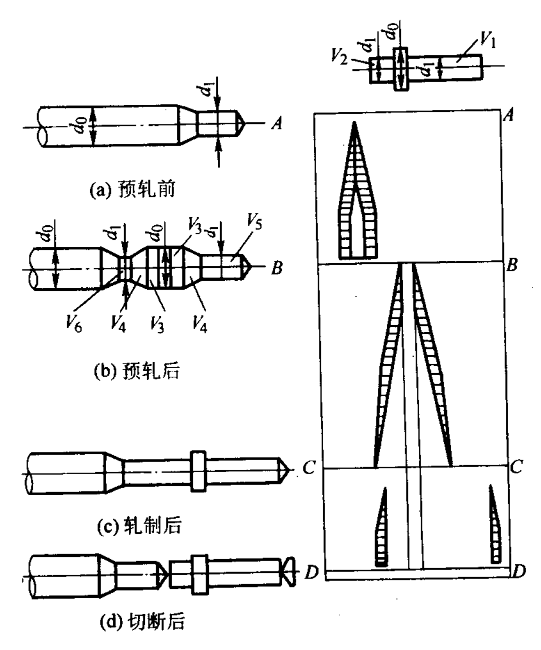


图 5.2-71 预轧楔轧制的模具图

在模具的 $A—B$ 段，设计一个特殊的预轧楔，将圆棒料轧成一个 V 形槽（图 5.2-71b），槽底直径为 d_1。

在模具的 $B—C$，设计一个对称楔，把非对称轴的全部形状轧成（图 5.2-71c）。

在模具的 $C—D$ 段，设计两个切刀，一个切刀将料头切除，另一个切刀将轧成的轴从长棒料上切下来，而长棒料的头部为预轧过的形状（图 5.2-71d）。

预轧楔的尺寸设计，应满足以下两个体积相等的关系式

$$V_1 + \Delta V = (V_3 + V_4) + V_5 \qquad (5.2\text{-}99)$$

$$V_2 + V_5 = (V_3 + V_4) + V_6 \qquad (5.2\text{-}100)$$

式中，V_1 为非对称轴右边直径部位的体积；V_2 为非对称轴左边直径部位的体积；V_3 为 d_0 直径部位的体积；V_4 为 d_0 直径过渡到 d_1 直径的锥体体积；V_5 为预轧后右边 d_1 直径部位的体积；V_6 为预轧后左边 d_1 直径部位的体积；ΔV 为料头体积。

式（5.2-99）与式（5.2-100）消去 V_5 后求得 V_6 的体积为

$$V_6 = (V_1 + V_2 + \Delta V) - 2(V_3 + V_4) \qquad (5.2\text{-}101)$$

V_5 的体积为

$$V_5 = (V_1 + \Delta V) - (V_3 + V_4) \qquad (5.2\text{-}102)$$

在模具设计中，按式（5.2-101）既可预先设定 V_3 求 V_6，也可以预先设定 V_6 求 V_3，然后按式（5.2-102）求 V_5。

如果非对称轴的两边直径不等时，或者其他尺寸变化时，虽然计算要复杂一些，并且会出现模具两边的斜楔不完全对称的情况，但基本设计思路是一致的。

最后要说明是：长棒料轧制的优点不只是解决了将非对称轴变为对称轴轧制这一点，与短棒料轧制比还有如下一些优点：

1）无需下料这个工序；

2）料头只有一个，而且是小直径（预轧后）的；

3）采用连续感应快速加热与其配套，机械化自动化水平高，产品质量高等。

所以，长棒料轧制也适用于对称轴类件的轧制。

6 机械设备

6.1 楔横轧机的基本类型

在国外与国内都有三种基本类型的楔横轧机（图 5.2-72）：单辊弧形式（简称弧形式）、辊式和板式楔横轧。

本节将这三种基本类型的楔横轧机的特点、应用范围及其主要技术特性等进行评述。

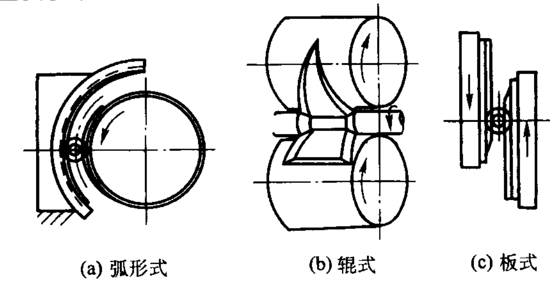


图 5.2-72 楔横轧机的三种基本类型

(1) 弧形式楔横轧机

弧形式楔横轧机的主要优点是结构简单、重量轻、设备造价低。

它与辊式楔横轧机相比较，只需驱动一个轧辊，可以省掉将一个传动转换为两同向转动的分齿机（又称齿轮座）部分，以及万向接轴、相位调整机构等。

它与板式轧机相比较，没有空行程及往返时的惯性载荷，故生产率高，每分钟能生产 10~25 个（对）产品。

但是，这种类型的轧机存在下述缺点。

1）由于轧件作行星运动，无法施加导板，轧制过程中轧件容易歪斜而卡住，尤其是非对称复杂零件更容易发生，此外产品精度也难以控制。

2）其中一支楔形模具为内弧形，加工制造相当困难。

3）轧机的工艺调整困难，尤其是径向与喇叭口的调整很难实施，故工艺不易稳定等。

由于该类型轧机存在上述较严重的缺点，因而无论国内、国外都应用较少。主要用于那些尺寸不大、形状较简单



产品的生产。

弧形式楔横轧机的传动简图如图 5.2-73 所示。

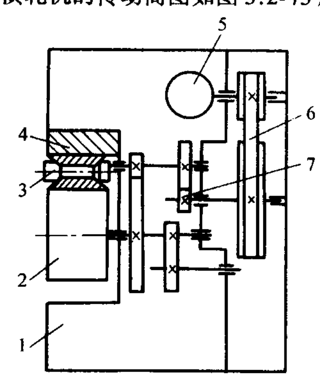


图 5.2-73 弧形式楔横轧机的传动简图

1—机架；2—轧辊及模具；3—轧件；4—弧形模具；5—电动机；6—带式减速机构；7—齿轮减速机构

俄罗斯设计的弧形式楔横轧机的主要技术特性列于表 5.2-5 中。

(2) 辊式楔横轧机

辊式楔横轧机是三种类型轧机中应用最广泛的。它的主要优点如下。

1) 生产率高，一般为 6 ~ 25 个（对）/min。

2) 设有导板装置。上下两个轧辊轧制时，左右有两个导板控制轧件。这样不仅可以防止轧件歪斜，保证轧制过程的稳定，而且可以有效地控制产品的尺寸精度，有利于精密楔横轧工艺的实现。

3) 一般都设有径向、轴向、相位及喇叭口调整机构，能方便、准确地实现工艺调整等。

辊式楔横轧机的缺点是：

1) 设备结构庞大、重量大、占地面积大；

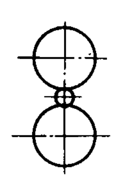
2) 模具加工需要大型机床等。

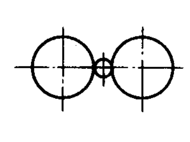
辊式楔横轧机按轧辊配置分为立式（图 5.2-74a）与卧式（图 5.2-74b）。立式楔横轧机与卧式楔横轧机比较具有占地面积小；进出料方便，导板装卸容易等优点。所以，国内外多采用立式楔横轧机。只是在小型楔横轧上采用卧式的。

辊式楔横轧机除二辊式外，还有三辊式（图 5.2-74c）。三辊式轧机的优点是：三个轧辊在三个方向（相差 120°）控制轧件，产品的精度高；三个方向轧制比二个方向轧制，更容易实现轴向流动，轧件心部应力状态改善，可以较好地控制轧件中心可能出现的疏松缺陷，由于取消了导板，不会发生导板刮伤轧件表面的缺点等。

表 5.2-5 俄罗斯设计的弧形式楔横轧机的主要技术参数

规格 \ 参数	C3135	C3137	C3138	C3139
轧制零件最大直径 D/mm	25	35	50	80
轧制零件最大直径 D/mm	250	315	400	500
轧辊直径 D/mm	320	400	510	640
轧辊转速/r·min^{-1}	60	50	32	25
电动机功率/kW	32	40	58	110
机械质量/t	4.8	6.8	9.5	18.5
外形尺寸 L/mm × B/mm × H/mm	2 150 × 1 350 × 2 150	2 300 × 1 400 × 2 430	2 520 × 1 540 × 2 600	3 060 × 2 560 × 2 740


(a) 二辊立式


(b) 二辊卧式

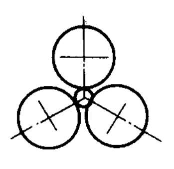

(c) 三辊式

图 5.2-74 辊式楔横轧机的轧辊配置图

但是，三辊式与二辊式比较，严重的缺点是：轧辊的最大外径受轧件最小直径的限制，否则将发生三个轧辊在最大直径处相碰的问题，不发生相碰的几何关系为：

$$D_{max} \leqslant 6.464 d_{min} \qquad (5.2\text{-}103)$$

式中，D_{max}为轧辊允许的最大直径；d_{min}为轧件轧制中的最小直径。

例如，当轧制零件直径最小处为 $\phi30$ mm 时，允许轧辊的最大直径为：

$$D_{max} = 6.464 D_{min} = 6.464 \times 30 \text{ mm} = 193.9 \text{ mm}$$

显然，由于辊径过小，多数产品在这么小的辊径上是无法完成的。

所以，三辊式与二辊式比较，尽管存在一些突出优点，但它只适合于轧件最小直径较大而长度较短的产品。而属于这类型的零件产品是很少的。加上三辊式较二辊式多一个轧辊，不仅结构复杂而且工艺调整难度也加大了。所以三辊式楔横轧机至今未被广泛采用。

(3) 板式楔横轧机

板式楔横轧机，与弧形式与辊式楔横轧机比较，最突出的优点是模具制造比较容易，由于它是平板的，只需一般的刨床或铣床就可以完成。

板式楔横轧机，由于是往复运动，有空行程，与辊式与弧形式比生产率是最低的，一般为 4 ~ 10 个（对）/min。此外，板式轧机还存在无法施加导板，以及调整比较困难等缺点。

板式楔横轧机有两种型式：一种为两个平板水平布置，如图 5.2-75 所示。另一种为两个平板垂直地面布置的，如图 5.2-76 所示。垂直与平行布置相比较，前者高但占地面积小，轧件上脱落的氧化皮不会掉在平板上影响轧件的表面质量。

德国、白俄罗斯与我国设计的板式轧机的技术特性列于表 5.2-6 中。

从上述三种基本类型的楔横轧机分析比较，可以看出二辊立式楔横轧机优点突出，应用最广泛。在我国已投入生产应用的楔横轧机，绝大多数是二辊立式楔横轧机，辊径从 $\phi350$ mm 到 $\phi1\ 400$ mm，大约 100 多台。



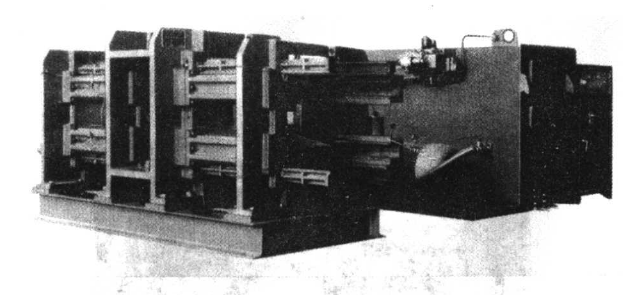


图 5.2-75 我国设计的平板水平布置板式楔横轧机

6.2 楔横轧机的总体配置

楔横轧机的总体配置有两种：整体式与分体式。

(1) 整体式楔横轧机

图 5.2-77 为整体式楔横轧机外形图，整体式楔横轧机的主要特征是，将工作机构、传动机构及主电机混为一体布置，这种轧机大多按锻压机床思路设计，力图使结构紧凑、减小占地面积，带离合器既能单动也可连续工作。这种轧机比较适合将楔横轧机作为连续锻造生产线的制坯工序使用。

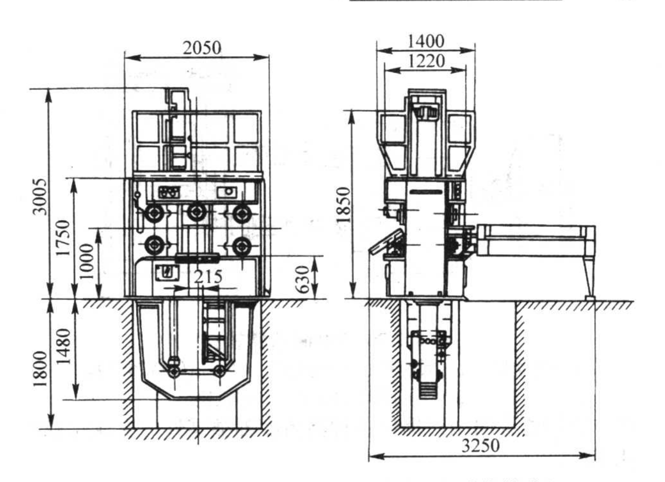


图 5.2-76 德国设计的平板垂直布置板式楔横轧机

表 5.2-6 德国（U WQ）、白俄罗斯（ПМ）、中国（D）板式楔横轧机主要技术参数

参数 / 规格	UWQ40	UWQ100	ПМ28	ПМ34	D25	D50
轧制零件最大直径 D/mm	40	100	40	70	25	50
轧制零件最大长度 L/mm	400	630	340	600	250	450
模具板行程/mm	1 600	2 500	1 400	2 400	1 000	1 600
电动机功率/kW	90	170	42	45	18.5	44
轧制力/kN	125	320	90	90		
轧机质量/t	11.5	60	5	5	3.5	9
生产率/个·min^{-1}	6.7	2.5	16.7	1.7	13	8
平板布置	立式	立式	卧式	卧式	卧式	卧式

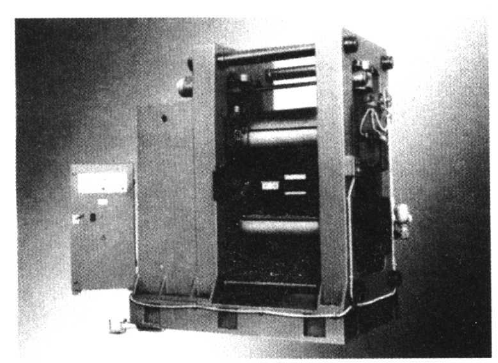


图 5.2-77 整体式楔横轧机外形图

但整体式轧机存在的缺点是：由于是靠齿轮传动，两个轧辊的调整受到限制；当轧辊径向调整时，相位也发生变化；传动齿轮不是在独立封闭的箱体中，故传动精度、温度与润滑都较差等。所以整体式轧机在轧制大型、高精度，尤其是专业化的楔横轧厂中很少采用。

整体式 D 型楔横轧机的主要技术特性列于表 5.2-7 中。

(2) 分体式楔横轧机

北京科技大学设计的 H 形楔横轧机如图 5.2-78、图 5.2-79 所示。

分体式楔横轧机是按冶金工厂用的轧钢机思路设计的。它将工作机座、传动装置与电动机分开布置。

表 5.2-7 D 型楔横轧机的主要技术参数

参数 / 规格	D46－35 ×400	D46－50 ×600	D46－70 ×700
轧辊直径 D/mm	500	630	800
轧辊宽度 l/mm	500	700	800
轧制零件最大直径 D/mm	35	50	70
轧制零件最大长度 L/mm	400	600	700
轧辊转速 r/min	14	10	8
电动机功率/kW	22	30	75
机器质量/t	7	12	20
外形尺寸 L/mm × B/mm × H/mm	1 950 × 1 500 × 1 800	2 300 × 1 800 × 1 900	2 900 × 2 400 × 2 600

分体式楔横轧机存在占地面积大等缺点，但优点非常突出。

1) 全部齿轮采用闭式传动，齿轮啮合精度与稀油润滑条件都得到保证，因而寿命长，传动噪声小。

2) 轧机机架采用闭式的，并设有预应力装置，不仅产品精度高，工艺稳定，而且容易控制轴件心部的疏松。

3) 轧辊可以方便、准确地实现径向、轴向、相位以及喇叭口的调整。

4) 工作机座、万向接轴与齿轮箱分开独立布置，设备安全可靠、维修方便。

5) 设置了可以上下、左右调整的导板装置等。

上述优点已为生产实践所证实。在我国得到最广泛的应



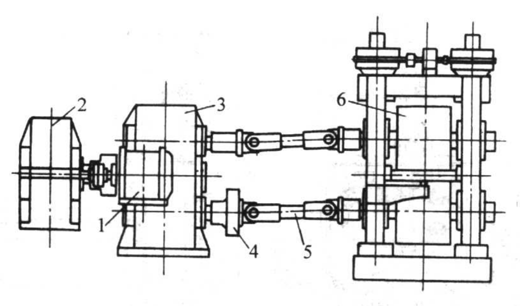


图 5.2-78 H1000 楔横轧机

1—电动机；2—减速机；3—分速机；4—相位调整机构；5—万向传动轴；6—工作机座

用。特别适合向用户提供各种高精度轴类零件的专业化楔横轧工厂。

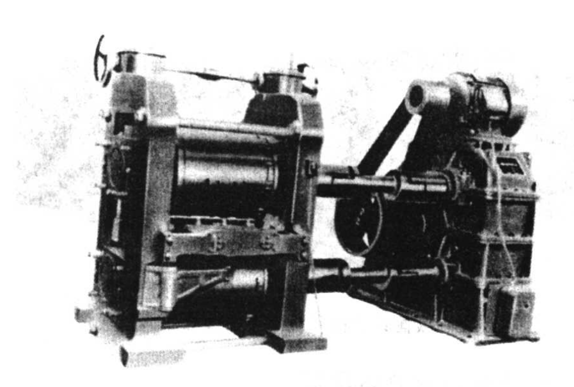


图 5.2-79 H630 型楔横轧机

H 型楔横轧机的主要技术特性列于表 5.2-8 中。

表 5.2-8 H 型楔横轧机的主要技术参数

项目 \ 规格	H500	H630	H800	H1000	H1200
轧辊直径 D/mm	500	620	800	1 000	1 200
轧辊宽度 l/mm	400	500	700	800	1 200
轧制零件最大直径 D/mm	35	50	80	100	120
轧制零件最大长度 L/mm	350	450	600	700	1 100
轧辊转速/r·min^{-1}	8/12	8/12/15	6/9/12	6/8/10	6/8
电动机功率/kW	30	37	75	110	150
机器质量/t	6	9	34	48	70
外形尺寸 L/mm × B/mm × H/mm	3 500 × 1 800 × 1 700	3 500 × 1 800 × 1 700	4 500 × 2 500 × 2 200	6 500 × 3 500 × 3 000	7 500 × 4 500 × 3 800

编写：胡正寰（北京科技大学）
张　巍（北京科技大学）

第3章 孔 型 斜 轧

1 概述

1.1 工作原理

螺旋孔型斜轧（简称孔型斜轧）的工作原理如图 5.3-1 所示。两个带螺旋孔型的轧辊，其轴心线相互交叉，轧辊以相同方向旋转并带动圆形轧件既旋转又前进，轧件在螺旋孔型的作用下，成形回转体零件毛坯。螺旋孔型斜轧的变形主要是直径压缩轴向延伸。

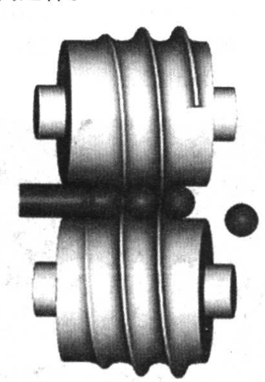


图 5.3-1 螺旋孔型斜轧原理图

孔型斜轧应用于球磨钢球、轴承钢球及滚子等零件或毛坯的生产。还可以用穿孔斜轧轧出空心毛管后，在带芯棒的螺旋孔型斜轧机上轧出空心的回转体零件毛坯，如自行车闸皮、轴的内座圈等。我国孔型斜轧的部分零件如图 5.3-2 所示。



图 5.3-2 我国螺旋孔型斜轧球磨和轴承钢球、汽车、电力、建筑等的零件

1.2 工艺特点

孔型斜轧是一种高效金属成形工艺。它是冶金轧制技术的发展，因为它将轧制等截面的型材，发展到轧制变截面的轴类零件；它又是机械锻压技术的发展，因为它将整体断续塑性成形，发展到局部连续塑性成形。孔型斜轧工件是在回转运动中成形的，所以又称它为回转成形，也有称它为特殊锻造的。由于成形的零件都是回转体轴类零件，故又称它为

孔型斜轧与常规的成形工艺——铸造、锻造和切削等相比，有以下优点。

1）单机生产率高。轧辊每转一圈生产一个产品（单头）或多个产品（多头）。轧辊转速一般为 40 ~ 500 r/min，即每分钟生产 40 ~ 3 000 个产品。与锻造相比生产率提高 5 ~ 20 倍。

2）材料利用率高。斜轧的材料利用率一般为 80% 以上，目前精密斜轧可达 95% 以上，即达到少无切削目的。

3）产品质量高。一是斜轧产品金属流线沿产品轴线保持连续（无切削断头）；二是轧后晶粒细化。因而产品的力学性能提高，某些斜轧产品的静载强度与疲劳强度较之切削产品提高了 30% 以上。

4）劳动条件改善。斜轧无冲击、少噪声，轧件的成形、精整、切断等工序均在孔型中连续自动完成，加上进出料容易实现自动化，因而改善了劳动条件，降低了工人的劳动强度。

5）产品成本降低。由于是连续局部成形，工作载荷很小。工作载荷只有一般模锻的几分之一到几十分之一，设备重量轻、体积小及投资省等。斜轧轧辊的寿命比锻模的寿命长 5 ~ 20 倍，同时可以大幅度减少生产人员、设备台数、占地面积，故大幅度降低成本等。

孔型斜轧的缺点是：一是只能生产回转体零件；二是模具设计与制造比较复杂；三是工艺调整难度大等。

由此可见，孔型斜轧是一项高产量、低消耗、可生产出高质量产品的先进制造技术，但模具复杂，调整困难，故它一般适合于轧制批量大、形状简单、长度小于 200 mm 的产品。一般情况下，单个零件质量为 1 kg 时，孔型斜轧的年经济批量为 20 万件以上。

楔横轧与孔型斜轧的比较，见表 5.3-1。

表 5.3-1 楔横轧、螺旋孔型斜轧的比较

	楔横轧	螺旋孔型斜轧
生产率/件·min^{-1}	4 ~ 25	40 ~ 3 000
工件直径 50 mm 的公差/mm	0.8	0.6
表面粗糙度 R_a/μm	6.3 ~ 100	3.2 ~ 50
平均材料利用率/%	85	90
模具复杂程度	较复杂	复杂
轧辊直径大小	大	小

1.3 国内外发展与应用简况

早在 19 世纪后期，就出现二辊斜轧穿孔机生产无缝钢管的历史。因此人们早就设想过能否应用斜轧运动原理，把轧辊做成螺旋孔型，用它轧制各种回转体零件。这个想法到 20 世纪 40 年代末在原苏联得到实现，即用它轧制轴承钢球与球磨钢球等。用这种热斜轧方法生产大直径的钢球与传统的锻造方法比较，具有效率高，球形尺寸精确，没有环带等优点。在世界上被确认为是一种轴类零件成形新工艺。原苏联随后将斜轧钢球技术卖给意大利、英国、中国等。以后，原苏联又成功实现用斜轧穿孔轧制无缝钢管，接着用孔型斜轧机，轧制成轴承内座圈，该技术卖给了美国。



用斜轧方法实现了以下零件的生产：用热轧生产散热器；用冷轧方法生产机床丝杠；用冷轧方法生产小钢珠等。这些应用都显示出斜轧技术的先进性。

尽管斜轧零件技术出现已有半个多世纪，但其应用并不广泛，这是由于斜轧技术的复杂性带来的。突出的是当轧制多台阶轴时，变导程、变高度的螺旋孔型无论设计与制造都很困难，严重制约了它的发展与应用。

我国斜轧技术的研究与开发始于 1958 年。从事这项工作的单位有：原一机部机械科学研究院、北京钢铁学院（现北京科技大学）、太原工学院（现太原理工大学）等。他们与工厂结合，首先将斜轧轴承钢球研制成功并局部应用于生产。由于历史的原因，到目前为止只有北京科技大学一直坚持斜轧零件成形的研究、开发与推广工作。

北京科技大学所做的主要工作如下。

1）球类产品已广泛应用。图 5.3-3 为斜轧钢球的产品图。

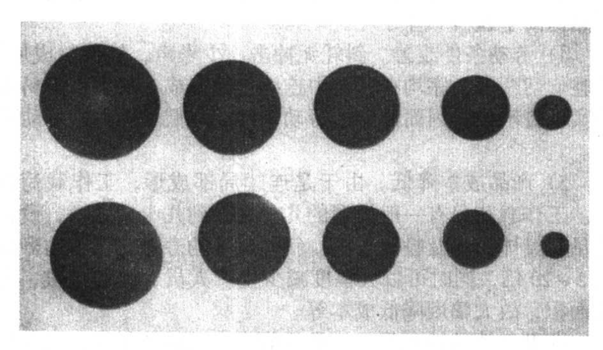


图 5.3-3　斜轧钢球

我国斜轧球类产品已得到相当广泛的推广应用。

① 球磨机钢球：直径 ϕ25～124 mm。

② 冷轧自行车钢珠：直径 ϕ3～6 mm。

③ 斜轧铝球：直径 ϕ6～50 mm。

④ 斜轧铜球：直径 ϕ25～45 mm。

2）斜轧复杂产品得到应用。由于斜轧零件变形机理的研究比较深入，模具实现 CAD/CAM，使我国在斜轧复杂产品上取得进展，并得到应用。

我国在 20 世纪 60～80 年代，在斜轧复杂产品取得领先世界的进展，先后轧出带尖的防滑钉、液压柱塞泵的柱塞、车床三爪卡盘上的伞齿、汽车转向球销、以及直径 ϕ110 mm，长度 170 mm 的汽车双联齿轮等产品。(见图 5.3-2)

由三个回转体组成的电力线路上的球头吊环，已在我国得到工业应用，如图 5.3-4 中所示。

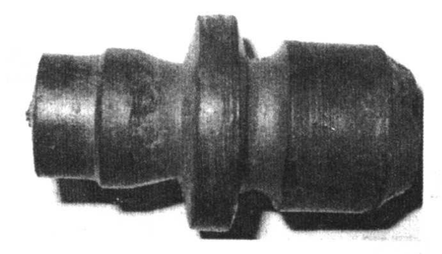


图 5.3-5　电钻钻体

斜轧复杂产品的研制成功，证明我国的斜轧技术水平已处于国际先进水平，为斜轧的更广泛应用打下良好基础。

3）冷斜轧锚杆获得成功。在我国已成功冷斜轧出带圆形螺纹的锚杆，如图 5.3-6 所示。这种自钻式新型锚杆，由于具有一系列优点，将被大量应用。这种锚杆采用厚壁钢管，经冷斜轧成形，用这种方法生产的锚杆不仅已用于我国重要工程，而且出口欧洲国家。

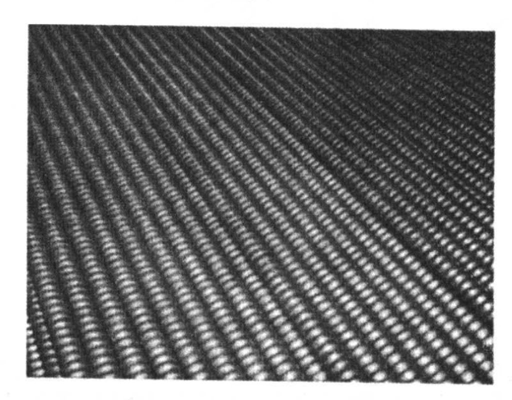


图 5.3-6　自钻式新型锚杆

4）精密热斜轧产品。我国在世界上首次用斜轧方法实现精密热轧某特殊产品，如图 5.3-7 所示。

这种零件在国内外都是靠机床多道切削工艺完成的。用斜轧方法实现一次轧制成形，轧制直径 ϕ6～12 mm 的公差在 ±0.03 已内，表面粗糙度为 R_a12.5～2.5 μm。与原切削工艺比，优点为：生产效率提高 4 倍；工序由 4 道成为 1 道；材料节省 23%等。



1）长棒料。从冶金厂来的棒料一般长度为4～6 m，到厂后应经检验，主要内容包括：化学成分、直径公差及椭圆度、表面有无缺陷、疏松级别等。

2）下料。根据棒料直径大小、加热方式、头和尾温度损耗，下料尺寸一般在1～3 m长。可用剪断机下料，其优点是生产率高、在断口处无材料损失，缺点是剪口有马蹄形。也可用带式锯下料，虽然有切口损失，但切口质量好。

3）加热。斜轧车间理想的加热方式为电感应加热。它与燃料加热比较，优点为不容易发生过热与过烧，产品质量有保证；氧化皮损失小；生产机动灵活；生产环境好且节省人力与地方；容易实验机械化、自动化生产等。所以，凡是有条件的工厂都应采用中频电感应加热。

4）轧制。轧制是主要工序。球磨钢球的成形在这里完成，所以也是整个生产流程的中心环节。对于碳素钢和低合金钢，一般轧制温度为1 050～1 150℃。轧机的生产率一般为每分钟70件。

5）淬火。利用余热淬火。利用余热将轧后钢球经保温后，进入水中淬火与自回火。

6）检验。钢球质量检验的目的在于保证产品质量符合锻件的质量标准。其检验的内容包括：尺寸与几何形状、表面质量、内部质量、力学性能与化学成分。

斜轧球磨钢球专业化工厂的车间布置，如图5.3-8所示。

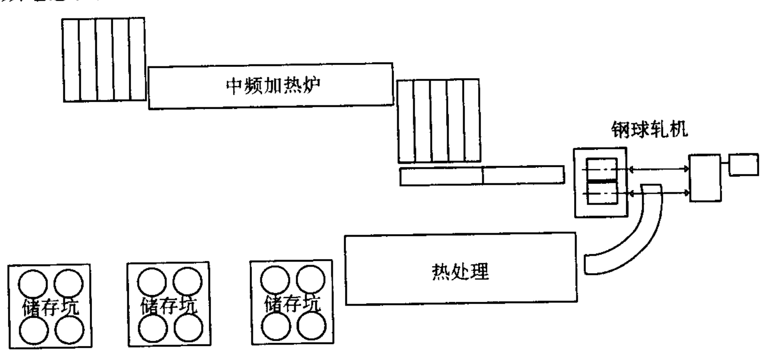


图5.3-8 斜轧球磨钢球专业化工厂的车间布置

2 轧制原理

2.1 斜轧回转体运动原理

图5.3-9为斜轧回转体运动示意图，O_1O_1 为轧件的轴心线，O_2O_2 为上轧辊的轴心线，O_3O_3 为下轧辊的轴心线。

轧辊在任意点的圆周线速度 v 为

$$v=\omega_0 R_k=\frac{\pi D_k n_0}{60} \quad (5.3\text{-}1)$$

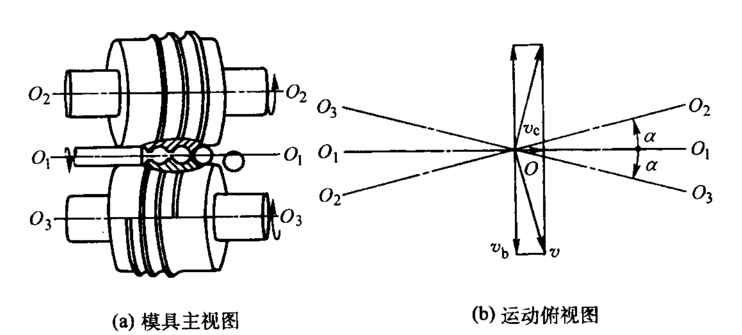
式中，ω_0 为轧辊角速度；R_k 为轧辊轧制半径；D_k 为轧辊轧制直径；n_0 为轧辊转速。

将 v 分解成垂直速度 v_b 和水平速度 v_c

$$v_b=v\cos\alpha=\frac{\pi D_k n_0}{60}\cos\alpha \quad (5.3\text{-}2)$$

$$v_c=v\sin\alpha=\frac{\pi D_k n_0}{60}\sin\alpha \quad (5.3\text{-}3)$$

式中，α 为轧辊轴线与轧件轴线的交叉角。



(a) 模具主视图　　(b) 运动俯视图

图5.3-9 斜轧回转体运动示意图

垂直速度 v_b 使轧件旋转，水平速度 v_c 使轧件沿轴线运动。

轧件所以能够得到前进运动，不只是轧辊圆周速度在水平方向有一个分速度 v_c 带动轧件的结果，还由于轧辊旋转时，螺旋孔型的推动，这个推动速度 u_0 为

$$u_0=\frac{n_0 S}{60}\cos\alpha \quad (5.3\text{-}4)$$

式中，S 为轧辊螺旋孔型的导程。

既然轧件轴向运动有两个方面的因素起作用，那么就存在这样一个问题：轧件的轴向运动取决于谁的速度运动，以及如何运动才是合理的。

要回答上述问题，需要讨论三种情况。

第一种情况为 $v_c>u_0$。即当倾斜角 α 的轧辊旋转时，轧辊摩擦带动轧件向前运动的速度大于轧辊螺旋孔型推动轧件向前运动的速度。由于螺旋孔型凸棱的限制，v_c 的速度是无法实现的，会出现轧件往前挤压孔型凸棱的情况。由于轧辊与轧件呈对滚运动，这样就容易发生凸棱切轧件前端面的现象，这是不利于轧制的。

第二种情况为 $v_c<u_0$。即出现与上面相反的情况。同样由于螺旋孔型凸棱的限制，v_c 的速度也是无法实现的，会出现轧辊孔型凸棱推着轧件后端面向前运动的情况。由于轧辊与轧件呈对滚运动，这样就容易发生凸棱切轧件后端面的现象，这样也是不利于轧制的。

第三种情况为 $v_c=u_0$。即轧辊摩擦带动轧件向前运动



的速度等于轧辊螺旋孔型推动轧件向前运动的速度，故轧制平稳，并且不会发生孔型凸棱切轧件前后端面的现象。这是我们希望的理想轧制关系。

实现 $v_c = u_0$ 的条件是

$$\frac{\pi D_k n_1}{60}\sin\alpha = \frac{n_1 S}{60}\cos\alpha$$

$$\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \frac{S}{\pi D_k}$$

$$\tan\alpha = \tan\beta$$

得

$$\alpha = \beta \tag{5.3-5}$$

式中，β 为轧辊螺旋孔型的螺旋升角。

以上分析与式（5.3-5）我们可以得到下面的结论：实现平稳而无前后孔型凸棱挤压轧件的轧制，在调整上应该使轧辊的倾斜角 α 等于轧辊孔型的螺旋升角 β。

由于轧辊孔型的导程与凸棱高度是变化的，所以轧辊孔型的螺旋升角 β 也是变化的，轧辊倾斜角 α 的调整除按上述理论外，尚需根据不同轧制特点作适当的调整。

根据轧辊螺旋升角 β 应等于轧辊倾斜角 α 这一原则，可以写出确定轧辊直径 D_a 的公式，即

$$D_a = \frac{S}{\pi\tan\beta} = \frac{S}{\pi\tan\alpha} = \frac{Zt}{\pi\tan\alpha} \tag{5.3-6}$$

式中，Z 为轧辊孔型的螺旋头数；t 为轧辊孔型的螺距。

精整段的螺距决定被轧产品的长度与凸棱的宽度。

把式（5.3-6）作成图 5.3-10。只要知道导程与螺旋升角，在图 5.3-10 上就能查到需要多大的辊径。

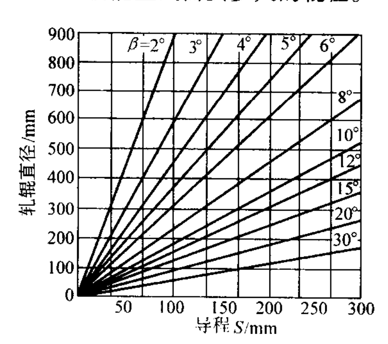


图 5.3-10 导程、螺旋升角与轧辊直径的关系曲线图

同一导程，不同的 β，可以得到不同的辊径。显然，β 以得越大，轧辊直径可以越小。所以，在实际运用中，轧制较长的产品一般多用 $\beta = 4° \sim 6°$。当 $\beta > 6°$时，辊径虽可以减小，但轧辊原始辊面就应该做成高次曲面辊形，否则轧辊就不能包络轧件。

2.2 斜轧螺旋体运动原理

斜轧螺旋体时，为使轧辊上的齿纹和轧件螺纹方向一致，轧辊的轴线与轧件的轴线互成一个不大的夹角，轧制时，旋转的轧辊使轧件沿轴线运动，逐渐轧出轧件的螺纹。

图 5.3-11 为两辊斜轧螺旋体时，轧辊和轧件的运动示意图，O_1O_1 为轧件的轴心线，O_2O_2 为上轧辊的轴心线，O_3O_3 为下轧辊的轴心线。轧制时，轧辊轴线与轧件轴线成一倾角 α。

位于轧辊上的任意点的圆周速度 v 为

$$v = \omega_0 R_k = \frac{\pi D_k n_0}{60} \tag{5.3-7}$$

式中，ω_0 为轧辊的角速度；n_0 为轧辊的转速；R_k 为轧辊轧制半径；D_k 为轧辊轧制直径。

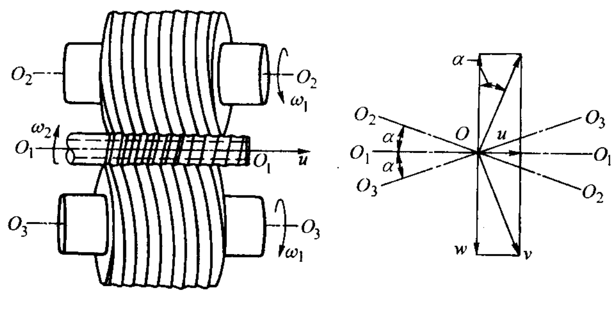


图 5.3-11 斜轧螺旋体运动示意图

再将速度 v 分解为平行和垂直于轧件轴线的分速度，可得到轧辊的轴向分速度 u 和旋转分速度 w，分别由下式确定

$$u = v\sin\alpha = \frac{\pi D_k n_0}{60}\sin\alpha \tag{5.3-8}$$

$$w = v\cos\alpha = \frac{\pi D_k n_0}{60}\cos\alpha \tag{5.3-9}$$

垂直速度使轧件得到旋转运动，水平速度使轧件得到前进运动，轧件因有垂直和水平速度而呈螺旋式前进。

在轧辊成形区内，轧辊的半径沿咬入接触区长度是变化的，但轧件在一定的轧制条件下，实际上只有一个确定的轴向和切向速度，那么就有一个轧制直径，根据实验可假定轧件的轧制直径 $d_k = d_2$（轧件的螺纹中径），轧辊的轧制直径 $D_k = D_2$（轧辊的螺纹中径）。

由图 5.3-11 可知螺纹轧制过程中，轧件之所以能够在前进的过程中形成正确的螺纹即轧件螺旋成形速度 u_1，不只是轧辊圆周速度在水平方向有一个分速度 u 带动轧件向前运动的结果，还由于轧辊旋转时，因轧件和轧辊的螺旋方向相反，轧辊的螺旋孔型向后推动轧件，有一个推动速度 u_0，那么轧辊与轧件就有相对轴向运动情况，若忽略轧件的轴向延伸及轧制时的轴向滑动系数，可建立轧件的运动方程。轧件的螺纹成形速度 u_1 等于轧件的轴向速度 u 即轧件相对导板的速度和轧辊孔型螺旋推动速度 u_0 在轧件轴线方向上的差值。

$$u_1 = u - u_0\cos\alpha \tag{5.3-10}$$

轧件的螺旋移动速度 u_1 为

$$u_1 = \frac{n_1 k_1 t_1}{60} \tag{5.3-11}$$

式中，n_1 为轧件转速；k_1 为轧件的螺旋头数；t_1 为轧件的螺距。

轧辊的螺旋移动速度 u_0 为

$$u_0 = \frac{n_0 k_0 t_0}{60} \tag{5.3-12}$$

式中，n_0 为轧辊转速；k_0 为轧辊的螺旋头数；t_0 为轧辊的螺距。

而在螺纹交叉点中径处轧辊和轧件为纯滚动，则轧辊和轧件的旋转线速度应相等，即

$$w = v\cos\alpha = \frac{\pi D_2 n_0}{60}\cos\alpha = \frac{\pi d_2 n_1}{60} \tag{5.3-13}$$

得到

$$n_1 = \frac{D_2 n_0}{d_2}\cos\alpha \tag{5.3-14}$$

将式（5.3-8）、式（5.3-11）、式（5.3-12）、式（5.3-14）代

入式（5.3-10）简化得

$$\tan\beta_1 - \tan\beta_0 = \tan\alpha \qquad (5.3\text{-}15)$$

这就是螺旋孔型斜轧零件的普遍公式。

讨论：有以下三种特殊类型的孔型斜轧。

1）环形孔型轧辊轧螺旋零件。当轧辊为环形孔型轧辊时，即轧辊的螺旋升角 β_0 等于零，式（5.3-15）变为

$$\tan\beta_1 = \tan\alpha$$

$$\beta_1 = \alpha \qquad (5.3\text{-}16)$$

即用环形孔型轧辊轧出螺旋零件，例如斜轧散热片。

2）螺旋孔型轧辊轧回转体零件。当轧辊轧制回转体轧件时，即轧件的螺旋升角 β_1 等于零，式（5.3-15）变为

$$\tan\beta_0 = \tan\alpha$$

$$\beta_0 = \alpha \qquad (5.3\text{-}17)$$

即用螺旋孔型轧辊轧回转体零件，例如斜轧钢球。

3）轧辊倾角为零时螺旋孔型轧辊轧螺旋零件　当轧辊间没有交角时，即轧辊间的交角 α 等于零，式（5.3-15）变为

$$\tan\beta_1 = \tan\beta_2$$

$$\beta_1 = \beta_2 \qquad (5.3\text{-}18)$$

即轧辊倾角为零时，用螺旋孔型轧辊轧螺旋零件，例如滚螺纹。

2.3　辊形曲面

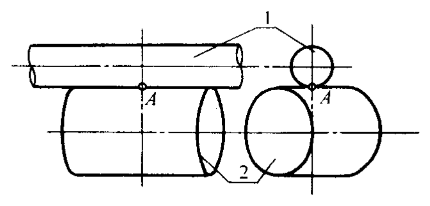
在斜轧生产中，对某些特殊形状以及尺寸精度要求较高的产品，其轧辊辊面应做成复杂的曲面，否则轧制不出合格的产品。因此，需要借助数学这个工具把它搞清楚。

辊形曲面问题，不但为研究斜轧的人员所关心，而且为一些研究数学与图形的人感到兴趣，故国内外都有不少关于这方面的文章与资料，涉及的面比较广。在这里，我们只就斜轧的原始辊形曲面这个基本图形的数学问题加以阐明。

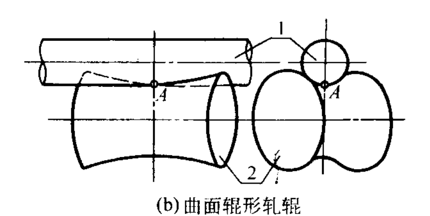
斜轧辊形中最基本的问题，即轧辊相对于轧件倾斜 α 角后，轧辊孔型底部应该是一个曲线，才能保证轧辊孔型底部与轧件原始棒料直径全部接触，或者说呈空间曲线包络。

这个问题实际上也是单孔型斜轧光面轧辊辊形的问题，同时也是钢管、钢棒斜辊矫直机辊形曲面的问题。

如果把单孔型轧制的光辊做成圆柱形（见图5.3-12a)，显然，轧辊与轧件只有一点 A 接触，轴向离 A 越远，轧辊表面与轧件表面间隙越大，无法实现全线接触轧制。所以，为了保证全线接触轧制，轧辊应做成曲面辊形（见图5.3-12b）。即轧辊与轧件的交叉点 A 的半径最小，轴向离 A 越远，轧辊的半径应该越大。这种形状的轧辊我们称作斜轧辊形曲面辊。



(a) 圆柱辊形轧辊



(b) 曲面辊形轧辊

图5.3-12　斜轧轧辊辊形图
1—轧件；2—轧辊

图5.3-13两个视图表示轧辊与轧件相互交叉 α_0 角的情况。沿主视图轧辊与轧件交叉点 M_0 的Ⅰ—Ⅰ剖开，投影到侧视图上，轧辊为圆且 R_0 半径最小，称它为喉径；轧件呈椭圆，其短轴半径为 r_0，长轴半径为 $r_0/\cos\alpha_0$。根据全线接触的要求，圆与椭圆应当相切，其切点 M'_0。

再沿主视图距Ⅰ—Ⅰ剖面 z 距离的Ⅱ—Ⅱ处剖开，在侧视图上轧辊仍为圆，其半径为 R；轧件仍为形状大小均不变的椭圆，但椭圆的中心 O' 在纵坐标上移动一个 t 的距离，其值为

$$t = z\tan\alpha_0 \qquad (5.3\text{-}19)$$

式中，α_0 为轧辊曲线与轧件轴线的交叉角。

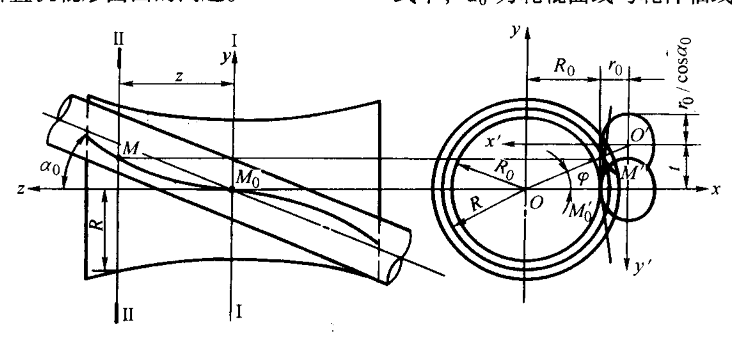


图5.3-13　斜轧辊形分析图

根据全线接触的要求，圆与椭圆仍然相切，其切点为 M'_0 改变 z 值，可以作一系列的截面，根据圆与椭圆相切，可以求出一系列切点 M。这些切点的连线在主视图上为 M_0M，在侧视图上为 M'_0M'，它就是轧辊与轧件全线接触空间曲线在主、侧两个视图上的投影。侧视图上 $\overline{OM'}$ 长就是距Ⅰ—Ⅰ截面 z 距离Ⅱ—Ⅱ截面处的轧辊半径 R。

下面利用坐标图求证 M_0M（M'_0M'）这个空间曲线的方程。如图5.3-13，以 O 为零点作 xOy 的坐标，又以 O' 为零点作 $x'O'y'$ 的坐标，其正负方向如箭头所示。

椭圆在 $x'O'y'$ 坐标系中，其参数方程为

$$\begin{cases} x' = r_0\cos\theta \\ y' = \dfrac{r_0}{\cos\alpha_0}\sin\theta \end{cases} \qquad (5.3\text{-}20)$$

式中，θ 为椭圆的离心角，也是轧件上接触线对应的包角。

椭圆在 xOy 坐标系中的参数方程经坐标变换后为

$$\begin{cases} x = R_0 + r_0 - r_0\cos\theta \\ y = t - \dfrac{r_0}{\cos\alpha_0}\sin\theta \end{cases} \qquad (5.3\text{-}21)$$

从式（5.3-20）、式（5.3-21）可以看出，不同的 z 值对应不同的 t 值，我们要求的接触曲线 M_0M（M'_0M'）是各种 t 值的椭圆与圆心为 O 的圆相切切点的轨迹，因此

$$\tan\varphi = -\frac{1}{\frac{dy'}{dx'}} \tag{5.3-22}$$

式中　φ——OM'线段与横坐标 x 的夹角。

将式（5.3-20）微分后得

$$\begin{cases} dx' = -r_0\sin\theta d\theta \\ dy' = \dfrac{r_0}{\cos\alpha_0}\cos\theta d\theta \end{cases}$$

所以

$$\frac{dy'}{dx'} = -\frac{1}{\cos\alpha_0\tan\theta}$$

将上式代入式（5.3-22）得

$$\tan\varphi = \cos\alpha_0\tan\theta \tag{5.3-23}$$

而 t 值可以写成

$$t = (R_0 + r_0 - x')\tan\varphi + y'$$

$$= (R_0 + r_0 - r_0\cos\theta)\tan\varphi + \frac{r_0}{\cos\alpha_0}\sin\theta$$

将式（5.3-23）代入上式后得

$$t = (R_0 + r_0 - r_0\cos\theta)\cos\alpha_0\tan\theta + \frac{r_0}{\cos\alpha_0}\sin\theta$$

$$= (R_0 + r_0)\tan\theta\cos\alpha_0 - r_0\sin\theta\cos\alpha_0 + \frac{r_0}{\cos\alpha_0}\sin\theta \tag{5.3-24}$$

将式(5.3-24)代入式(5.3-21)后得

$$\begin{cases} x = R_0 + r_0 - r_0\cos\theta \\ y = (R_0 + r_0)\tan\theta\cos\alpha_0 - r_0\sin\theta\cos\alpha_0 \end{cases} \tag{5.3-25}$$

这就是接触曲线 M_0M 在 xOy 面上的投影参数方程。

将式(5.3-24)代入式(5.3-19)后得

$$z = \frac{t}{\tan\alpha_0} = (R_0 + r_0)\tan\theta\cot\alpha_0\cos\alpha_0 + r_0\sin\theta\sin\alpha_0 \tag{5.3-26}$$

综合式（5.3-25）、式（5.3-26）便得到以 θ 为参数的接触曲线空间坐标方程为

$$\begin{cases} x = R_0 + r_0(1 - \cos\theta) \\ y = (R_0 + r_0)\tan\theta\cot\alpha_0 - r_0\sin\theta\cos\alpha_0 \\ z = (R_0 + r_0)\tan\theta\cot\alpha_0\cos\alpha_0 + r_0\sin\theta\sin\alpha_0 \end{cases} \tag{5.3-27}$$

在辊形设计中，需要确定各种 z 值下得轧辊半径 R，因而要求写出求 R 的公式。

从图 5.3-13 中可以得出下面的关系

$$R = \frac{R_0 + r_0(1 - \cos\theta)}{\cos\varphi} \tag{5.3-28}$$

综合式（5.3-23）、式（5.3-26）、式（5.3-28）得

$$\begin{cases} \tan\varphi = \cos\alpha_0\tan\theta \\ Z = (R_0 + r_0)\tan\theta\cot\alpha_0\cos\alpha_0 + r_0\sin\theta\sin\alpha_0 \\ R = \dfrac{R_0 + r_0(1 - \cos\theta)}{\cos\varphi} \end{cases} \tag{5.3-29}$$

这组方程式就是用来计算辊形曲面的方程式。当喉颈 R_0、轧件半径 r_0、轧辊与轧件交叉角 α_0 为已知数时，给定一个 θ 角就可求出一个 φ 角，再将 θ 与 φ 角代入式（5.3-26），便可求出一个相对应的 z 与 R 值，这样就达到我们求斜轧辊形曲面的目的。

例：已知 $R_0 = 110$ mm　$r_0 = 6.2$ mm　$\alpha_0 = 5°40'$。

求 θ 从 0°到 6°时的 φ、z 和 R。

解：将已知数代入式（5.3-29）后得

$$\tan\varphi = \cos5°40'\tan\theta$$

$$\varphi = \arctan(0.995\ 1\tan\theta)$$

$$z = (110 + 6.2)\tan\theta\cot5°40'\cos5°40' + 6.2\sin\theta\sin5°40'$$

$$= 1\ 165.35\tan\theta + 0.61\sin\theta$$

$$R = \frac{110 + 6.2(1 - \cos\theta)}{\cos\varphi} = \frac{116.2 - 6.2\cos\theta}{\cos\varphi}$$

将 θ 从 0°、1°、2°、…、6°代入上式后，求出相应的 φ、z 和 R，其结果列于下表中。

θ/ (°)	0	1	2	3	4	5	6
φ/ (°)	0	05 941	15 925	259 087	35 850	45 833	55 815
z/mm	0	20.35	40.72	61.11	81.53	102.01	122.55
R/mm	110.00	110.02	11.07	110.16	110.28	110.44	110.63

为进一步看清的 a、z 与 R 相应关系，我们把式（5.3-29）改造如下。

令 $\eta = r_0/R$，则式（5.3-29）可以改写为

$$\begin{cases} \tan\varphi = \cos\alpha_0\tan\theta \\ \dfrac{Z}{R_0} = (1 + \eta)\tan\theta\cot\alpha_0\cos\alpha_0 + \eta\sin\theta\sin\alpha_0 \\ \dfrac{R}{R_0} = \dfrac{1 + \eta(1 - \cos\theta)}{\cos\varphi} \end{cases} \tag{5.3-30}$$

式中，η 为轧件半径 r_0 与轧辊喉圆半径 R_0 之比。

当 $\eta = 0.2$ 时，Z/R_0、α_0 与 $\left(\frac{R}{R_0} - 1\right) \times 1\ 000$ 的关系曲线表示在图 5.3-14 上。

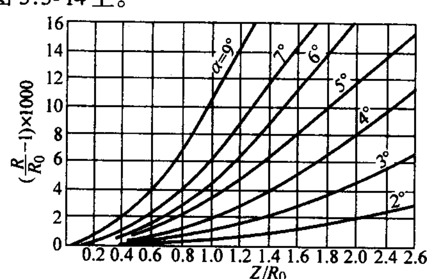


图 5.3-14　$\frac{Z}{R_0}$、α_0 与 $\left(\frac{R}{R_0} - 1\right) \times 1\ 000$ 的关系图

3　变形机理

3.1　有限元数值模拟

（1）假设条件

斜轧过程是一个非常复杂的大变形过程，建模时，要尽量考虑多种因素，以便对成形过程得到比较真实的描述。根据斜轧工艺的实际情况，为便于进行有限元分析计算、减小计算时间和所需硬盘空间，同时保证有较高的精度，保证主要的忽略次要的，在建立模型时作了如下简化与假设。

1）轧辊为刚体。由于轧制是在高温下进行，轧辊的弹性变形比塑性变形小得多，对轧件的变形影响很小，故可以忽略轧辊的弹性变形。这样可以在很大程度上减少模拟的计算量。

2）轧件为刚塑性。轧制过程中轧件的塑性变形量相对与弹性变形量非常大，所以弹性变形对轧制过程影响较小可以忽略。

3）忽略轧辊和轧件之间热传导，以及轧件向空气中散热。认为在轧制过程温度保持不变。

4）轧辊与轧件接触部分为库仑摩擦，其摩擦系数视为常数。

5）轧制时轧件与导板无接触，即轧件与两个轧辊的轧



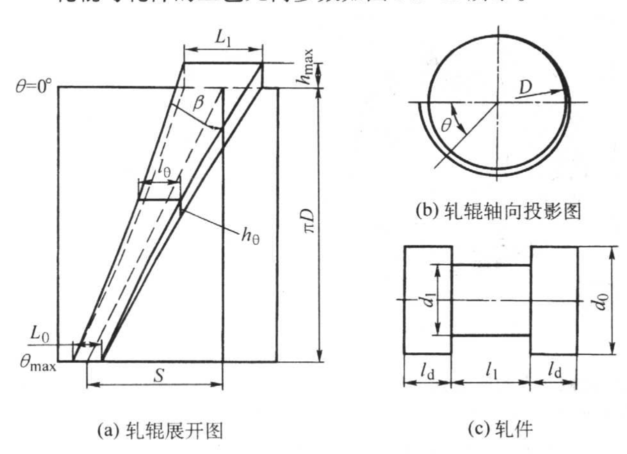
制条件完全对称。

6）有限元在处理接触问题时需要限定一定的距离，在此距离内轧辊节点和轧件节点被认为是接触点。假设轧件节点和轧辊节点距离为轧件最小单元长度的 1/20 时两点为接触点。

7）轧辊按固定步长转动。在实际轧制过程中，轧件变形是连续进行的。但在有限元计算过程中，迭代过程不可能做到完全连续，轧辊必须按固定的时间步长转动，两步之间的轧件变形不计算。

（2）有限元模型的建立

轧辊与轧件的工艺几何参数如图 5.3-15 所示。



(a) 轧辊展开图　　(c) 轧件

图 5.3-15　轧辊与轧件的工艺几何参数示意图

有限元数值模拟以钢为材料，故选择轴类零件常用有代表性的 45 钢为材料模型。轧制温度为 1 150℃。在此温度下 45 钢的力学物理特性材料的应力 – 应变曲线如图 5.2-24 所示。

Pro/E 软件环境下，经二次开发建立斜轧模具与轧件的三维参数化模型。其斜轧单槽阶梯轴的几何模型，如图 5.3-16 所示。

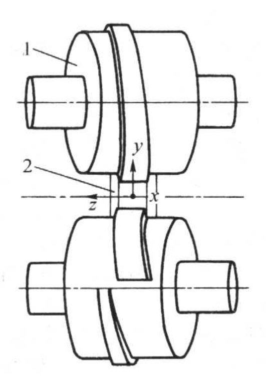


图 5.3-16　斜轧阶梯轴几何模型示意图

1—轧辊；2—轧件

用 Ansys/Ls – Dyna 有限元软件建立了斜轧有限元分析模型，如图 5.3-17 所示，模拟了斜轧阶梯轴的过程。

斜轧基本单元体轧制过程的有限元模拟主要有三个步骤。

1）前处理。确定轧辊与轧件的工艺参数，输入轧辊模型，生成轧件模型，给定轧辊与轧件的边界条件等。

2）计算求解。将前处理完成后形成的信息文件模型，经编辑后，在 Ls – Dyna 求解器中求解。本文内容涉及的模型，其轧辊与轧件的总单元数一般在 50 000 ~ 80 000 个之间。

3）后处理。求解完成后，再次进入 Ansys 软件中，利用通用后处理器和时效后处理器就可以得到丰富的结果信息，包括轧件在不同位置，不同时刻的有关信息。

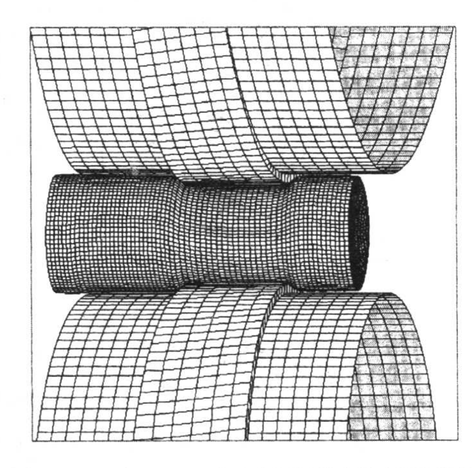


图 5.3-17　在 ANSYS 中建立的零件斜轧有限元模型

3.2　轧件上的应变场

轧件的 xy 截面为横截面，该截面内金属沿轴向流动受阻，产生非圆，应力应变较大。轧辊对轧件的作用力在 y 方向，沿轴线方向为 z 向，在纵截面内，金属受轧辊凸棱的直接作用，变形量较大，同时轧辊凸棱还在轴向给轧件很大的摩擦作用，使金属轴向流动受阻。研究和实验结果表明，疏松通常产生在轧件的中心轴线附近。因此确定轴截面 yz 和中间横截面 xy 为典型平面。

轧辊在旋转过程中的不同时间点对应着轧件的不同应力应变状态，轧件内部不同位置的应力应变也不同。

限于篇幅，这里选取断面收缩率 ψ 为 50%、轧件坯料 d_0 为 40 mm、被轧长度 L_1 为 40 mm、轧辊成形角 θ 为 360° 工况的一些典型时期和截面进行研究。

（1）横截面的应变分布

轧制中期轧辊转动 180°时，轧件横截面上的应变分布，如图 5.3-18 所示。

从图 5.3-18 可以看出，在轧件横截面上产生很不均匀的应变场 ε_x、ε_y、ε_z，但存在基本趋势与规律，即横向应变 ε_x 与纵向应变 ε_y 主要是压缩应变，轴向应变 ε_z 主要是拉伸应变，再叠加上轧辊作用产生的应变。

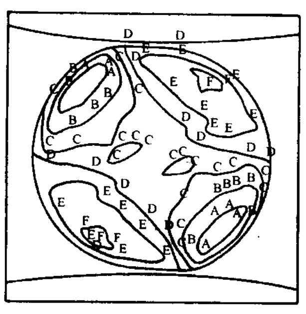
图 5.3-18a 为横截面上横向应变 ε_x 的分布。其特点是整个截面上基本上是压缩应变，但分布很不均匀，最大值为 – 0.26 发生在偏向入口方向的附近，如图 5.3-18a 中的 A、B 处。最小值为 – 0.047 发生在与轧辊接触部位下面，如图 5.3-18a 中 E 处。可以认为在横截面直径方向被均匀压缩，再加上轧辊作用产生的拉伸与压缩叠加综合的结果。

图 5.3-18b 为横截面上纵向应变 ε_y 的分布。其特点是整个截面上基本上是压缩应变，但分布很不均匀的。不同的是：纵向应变 ε_y 与横向应变 ε_x 的大小位置正好相反，最大值 – 0.28 发生在与轧辊接触部位下面，如图 5.3-18b 中的 A、B 处，而最小值为 – 0.025，发生在偏向入口方向的附近，如图 5.3-18b 的 F 处。

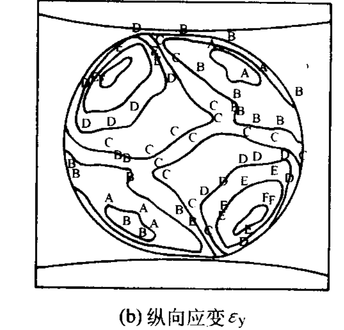
图 5.3-18c 为横截面上轴向应变 ε_z 的分布。其特点是整个横截面上都是拉伸应变，分布较均匀。最大值发生在中心，其值为 0.318。

从反映应变强度的等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 看，如图 5.3-18d 所示，整个等效应变在横截面分布均匀，圆周的外层值相对较大，越往中心相对减小，其差值不大。说明斜轧轧件的变形强度是外层逐步向中心渗透的一个过程，这是斜轧轧件变形重要特征之一。

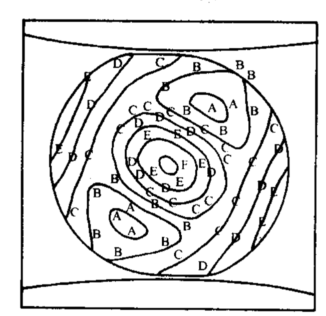




(a) 横向应变 ε_x



(b) 纵向应变 ε_y



(c) 轴向应变 ε_z

EPPLEQV
A=.439044
B=.457235
C=.475426
D=.493618
E=.511809
F=.53

(d) 等效应变 $\bar{\varepsilon}$

图 5.3-18 轧辊转动 180°轧件横截面上的应变场

$\psi = 50\%$ $d_0 = 40$ mm $L_1 = 40$ mm $\theta = 360°$

从图 5.3-18 可以看出在横截面上变形主要为二向压缩（y 向与 x 向），一向拉伸（z 向）。

（2）纵截面的应变分布

轧制中期轧辊转动 180°时，轧件纵截面上的应变分布，如图 5.3-19 所示。

图 5.3-19a 为纵截面上横向应变 ε_x 的分布。在轧制区域为压缩应变，最大值 -0.14，发生在轧件心部，如图 5.3-19a 中的 A 处，而最小值为 -0.047，发生在与轧辊接触部位下，如图 5.3-19a 的 E 处。ε_x 在变形区内由表面向心部逐渐变大。

图 5.3-19b 为纵截面上纵向应变 ε_y 的分布。在轧制区域的纵向应变 ε_y 与横向应变 ε_x 的分布与大小基本相近。不同的是：纵向应变 ε_y 与横向应变 ε_x 的大小位置正好相反，最大值 -0.25 发生在与轧辊接触部位下面，如图 5.3-19b 中的 A 处，而最小值为 -0.178，发生中心部位，如图 5.3-19b 的 C 处。

图 5.3-19c 为纵截面上轴向应变 ε_z 的分布。在与轧制区域为均匀的拉伸应变，其值为 +0.3，沿轴线由轧制区中心向轧件两端逐步减小到 -0.086。这表明轧件心部金属发生比较稳定的轴向流动。

图 5.3-19d 是纵截面上的等效应变分布，在与轧辊接触区域的等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 分布非常均匀，为 0.47，等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 值沿轴线由中心往轧件两端部逐渐从 0.47 变为 0.04。

（3）横截面上的等效应变特征

等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 是反映变形强弱的指标，轧件中心横截面在变形过程中，不同时刻其等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 的强弱是不同的。图 5.3-20 为中心横截面在不同时刻的等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 的分布。

1）轧制过程是一个连续小变形过程，在变形初期当轧辊转动到 3°时，轧辊凸棱刚咬入轧件，等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 主要集中在轧件的表层轧辊接触处（图 5.3-20a），表现为最大应变可以达到 0.077，而内部应变为 0。随着轧辊的转动轧制过程的进行，等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 不断由外层渗入到心部（图 5.3-20b、c、d、e、f、g、h），同时，由轧辊接触处逐渐扩展到整个外轮廓区域，等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 在表层和内部的差值相对变小，在截面外轮廓区域上等值线更密，更加均匀。

2）当轧辊转动到 180°后（图 5.3-20c），截面上的等效应变场的分布状态基本上不再变化，等效应变差值基本上不再变化，这说明整个轧制区域变形稳定。只是等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 随着轧辊的转动，凸棱的不断升高，其值不断增加，一直增加到 1.319。

3）横截面逐渐变为非圆截面，接触区沿轧辊前进方向的轧件表面产生了凸起，表明进入塑性后在轴向金属塑性流动有困难，多余金属形成非圆体积。

（4）纵截面上的等效应变特征

图 5.3-21 是轧件中心垂直纵截面 yz 面在轧制过程中，不同时刻的等效应变分布。

1）当轧辊转动到 3°时，纵截面上的等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 主要发生在外层，轧辊接触处，并向轧件中心方向减小中心值为 0（图 5.3-21a）。随着轧辊的转动轧制过程的进行，等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 不断由外层渗入到心部，等效应变 $\bar{\varepsilon}$（图 5.3-21b、c、d、e、f、g、h）在表层和内部的差值相对变小，这说明整个变形区域更加均匀，表层金属和内部金属轴向流动相差较小。

2）当轧辊转动到 94.5°后（图 5.3-21c），截面上的等效应变场的分布状态基本上不再变化，只是等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 随着轧辊的转动，凸棱的不断升高，其值不断增加，即从 0.36 增加到 1.298。

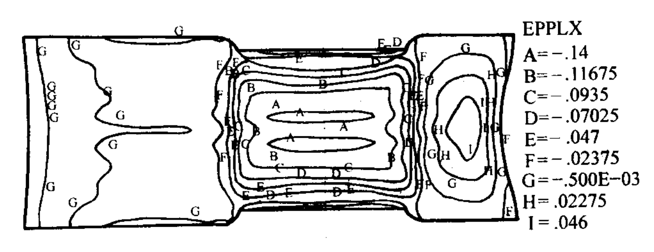
3）在变形初期，在轧件纵截面上产生很不均匀的应变场，等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 主要发生在外层，造成表层和心部的金属的流动速率不同，表层金属流动较快而内部金属流动较慢，表现为在轧件端部形成漏斗形凹陷。

3.3 轧件上的应力场

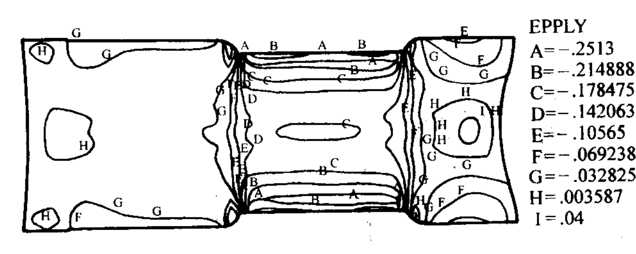
（1）横截面上的应力分布

轧制中期轧辊转动 180°时，轧件横截面上的应力分布，如图 5.3-22 所示。

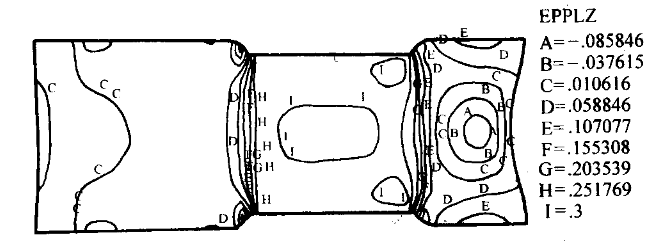
从图 5.3-22 可以看出，在轧件与轧辊接触的局部，由于金属流动受阻，造成横向应力 σ_x、纵向应力 σ_y 与轴向应力 σ_z 均为比较大的压应力，在接触点最大，达到 -215 ~



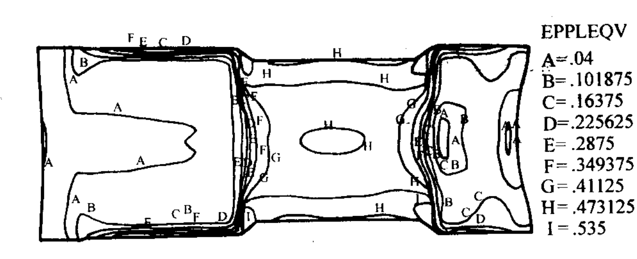
(a) 横向应变 ε_x



(b) 纵向应变 ε_y



(c) 轴向应变 ε_z



(d) 等效应变 $\bar{\varepsilon}$

图 5.3-19　轧辊转动 180°轧件纵截面上的应变场

$\psi=50\%$　$d_0=40$ mm　$L_1=40$ mm　$\theta=360°$

-258 MPa 之间。离接触点越远其值逐步下降。

图 5.3-22a 为横向应力 σ_x 的分布，非常明显地显示了由于轧件横向变形，在轧件中心产生拉应力，数值为 +78 MPa。

图 5.3-22b 为纵向应力 σ_y 的分布，在轧件出口局部，由于接触局部径向变形的带动，出现不大的拉应力，其值为 +0.05 MPa，在轧件的中心应力很小，为 -32.206 MPa。

图 5.3-22c 为轴向应力 σ_z 的分布，在轧件中心及通过中心的水平方向，均出现较大的拉应力，数值为 +60 MPa，这是由于轧件与轧辊接触局部发生强烈轴向流动造成的。

(2) 纵截面上的应力分布

轧制中期轧辊转动 180°时，轧件纵截面上的应力分布，如图 5.3-23 所示。

从图 5.3-23 可以看出，纵截面上的应力分布与横截面上的应力分布相似，在轴向轧件与轧辊接触整个外层，横向应力 σ_x、纵向应力 σ_y 与轴向应力 σ_z 都为压应力，最大值达到 -229 ~ -258 MPa，从外层向中心逐步减少。

图 5.3-23a 为横向应力 σ_x 的分布。沿轴向轧件中心都出现拉应力，其拉应力值在 74 ~ 120 MPa 之间。

图 5.3-23b 为纵向应力 σ_y 的分布。沿轴向轧件中心出现不大的拉应力或者压应力，数值为 -27 ~ +50 MPa。50 MPa 的拉应力发生在端部位置，-27 MPa 的压应力发生在轧件心部位置。

图 5.3-23c 为轴向应力 σ_z 的分布。沿轴向轧件中心产生较大的拉应力，数值为 +31 ~ +68 MPa，最大值 +68 MPa 发生在端部位置。

从横截面与纵截面上的应力场分布特点，可以看出在轧件的中心，出现两向比较大拉应力，即横向应力 σ_x 与轴向应力 σ_z，另一向纵向应力 σ_y 一般为数值不大的拉应力或者压应力。所以在轧件中心出现比较大的平均应力 σ_m。

3.4　轧件心部疏松机理

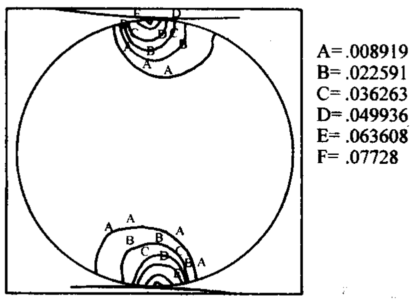
斜轧轧件的内部经常出现一些微小的彼此不连接的裂纹，人们称其为“疏松”或“曼内斯曼破坏”。在一些极端条件下，这些裂纹彼此连接形成较大的裂纹，甚至在轧件心部形成孔洞。疏松问题严重制约着斜轧工艺的发展和应用。因此，研究斜轧内部疏松产生原因，对改善轧件心部质量具有重要的实用价值。对于疏松的产生原因，国内外学者进行了广泛的研究，提出了不同的见解。由于疏松的产生原因复杂涉及到宏观应力应变、变形温度、变形速度、轧件的变形量和材料微观方面的原始晶粒尺寸、位错类型和材料组织类型等多方面的因素，因此还没有形成统一的观点。对于疏松的是否产生很难通过一个简单的数学公式作为判据，应该综合考虑各方面因素的影响。在这些因素中，不同的因素对疏松产生的影响相差很多。

通过对数值模拟结果的分析，斜轧过程的变形和应力状态已经清楚了。塑性变形从接触表面开始，并随着压缩量不断增加，塑性变形不断向里渗透。等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 在截面内的分布明显的不均匀，各点的等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 随着轧制过程是单调递增的；轧辊凸棱下轧件各截面中心点的轴向应变 ε_z 为拉伸应变，且与第一应变主方向完全重合；而径向应变 ε_y 和横向应变 ε_x 为压缩应变，则以轧件每转半圈为一个周期，呈现规则性交替变化。主变形状态图是两缩（x、y 向）一伸（z 向）。

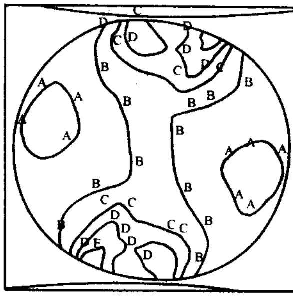
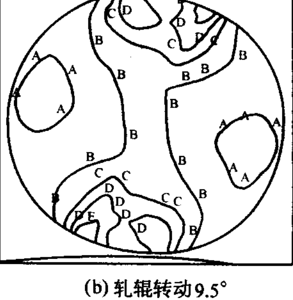
轧辊凸棱下轧件中间截面中心点处于纯剪切应力状态，即轴向应力 σ_z 与第二主应力完全重合，第一主应力、第二主应力呈周期变化；而第三（Y 向）主应力则呈正负交替变化，基本处于两拉（X、Z 向）一压（Y 向）或三向拉应力状态。

图 5.3-24、图 5.3-25 分别表示轧辊凸棱下轧件横截面中心点、边缘点的等效应力 $\bar{\sigma}$，平均应力 σ_m 和等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 的时序变化曲线。由图 5.3-24 可见，截面中心点的等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 随轧制进程（时间）递增，轧件心部平均应力 σ_m 始终为拉伸应力，而图 5.3-25 所示，截面边缘点的等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 同样随轧制进程递增，但轧件截面边缘点的平均应力 σ_m 基本为压应力。斜轧实心坯的破裂之所以产生在中心区域而不在表层附近，有两个原因。一是由于在这两个区域的平均应力 σ_m 的差别很大；在表层附近区域尽管塑性变形达到最大，但该区域的平均应力 σ_m 却是压缩应力，因此该区域的静水压力大，塑性好，不宜开裂；在中心区域塑性变形仍然很大，而平均应力 σ_m 却为拉伸应力，拉伸的平均应力 σ_m 使该区域的塑性差、宜开裂。二是由于在中心区域产生应力集中，当应力集中不能被变形过程所松弛，必将以裂缝的发生与发展过程来松弛，接着产生疏松与破裂。

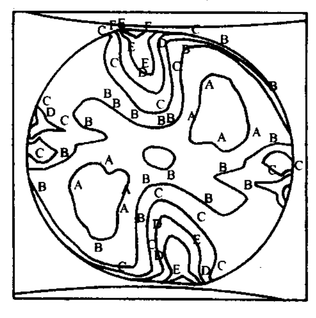




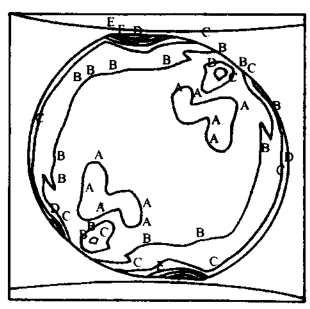
(a) 轧辊转动3°

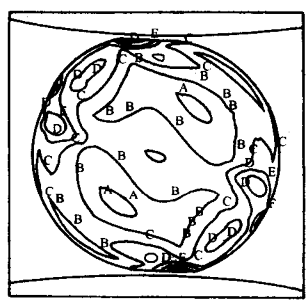
(b) 轧辊转动9.5°



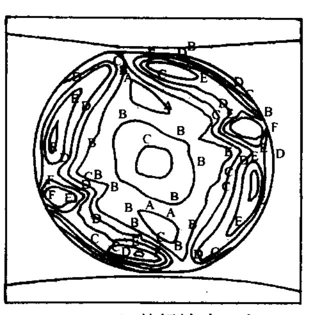
(c) 轧辊转动47°



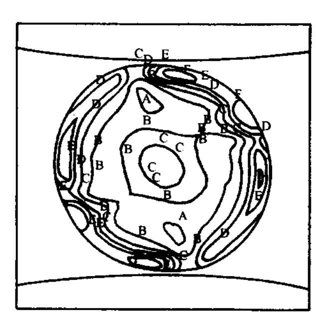
(d) 轧辊转动94.5°



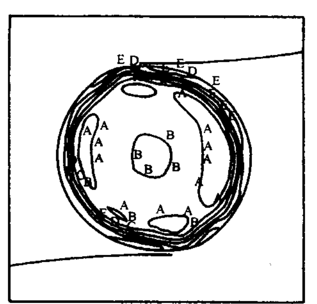
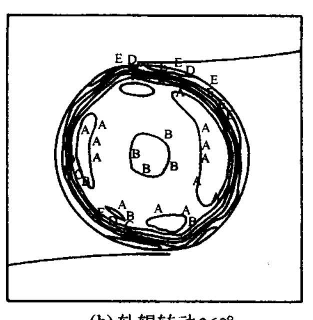
(e) 轧辊转动132°



(f) 轧辊转动180°



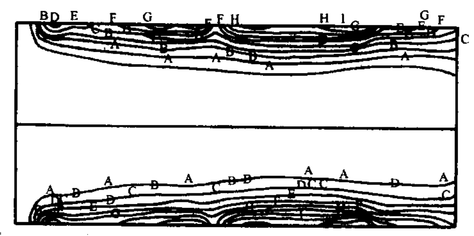
(g) 轧辊转动252°

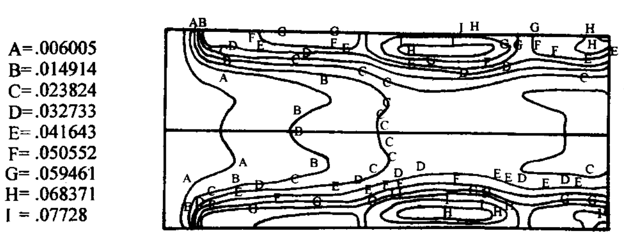
(h) 轧辊转动360°

图 5.3-20 轧件横截面上不同时刻的等效应变场

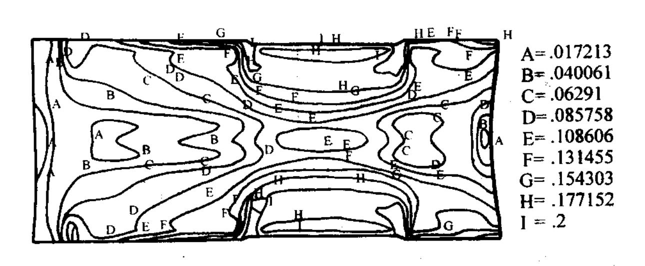
$\psi = 50\%$ $d_0 = 40$ mm $L_1 = 40$ mm $\theta = 360°$



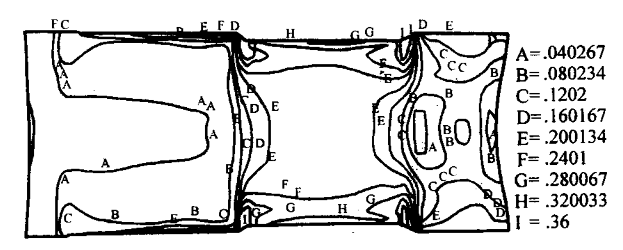
(a) 轧辊转动3°



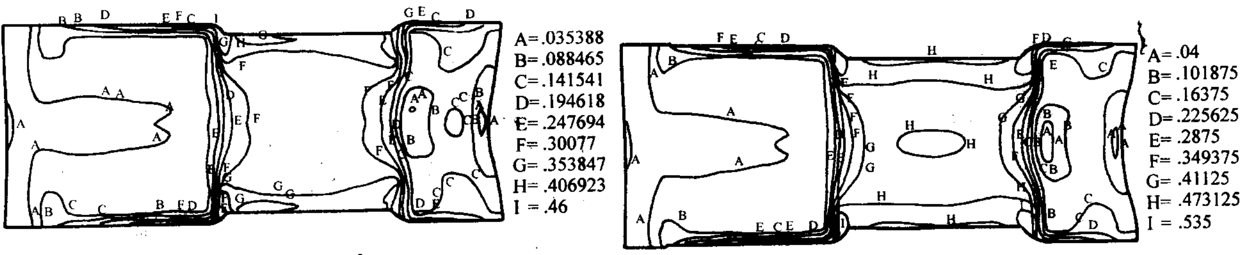
(b) 轧辊转动9.5°



(c) 轧辊转动47°

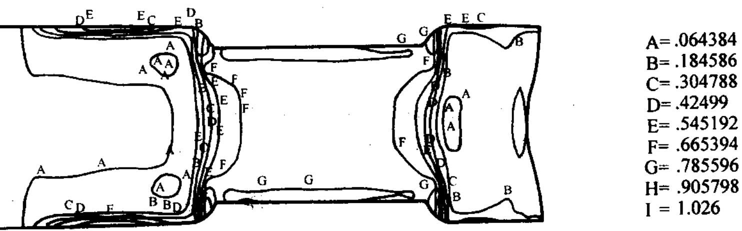


(d) 轧辊转动47°

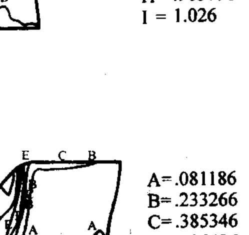


(e) 轧辊转动132°

(f) 轧辊转动180°



(g) 轧辊转动252°



(h) 轧辊转动360°

图 5.3-21 轧件纵截面上不同时刻的等效应变场

$\psi=50\%$ $d_0=40$ mm $L_1=40$ mm $\theta=360°$

综合以上的分析，我们对斜轧实心坯中心可能产生疏松和破坏的机理有了新的认识；应力状态对裂纹的扩展有重要影响。静水压力对推迟裂纹的萌生和阻止裂纹的扩展有重要作用，而拉应力作用与其相背。我们认为分析塑性破坏需要综合考虑变形、拉伸应力并配合变形历史和可能叠加的静水压力。

4 轧制压力与力矩

4.1 轧辊与轧件的接触面积

由于螺旋孔型斜轧的变形过程是相当复杂的，即使不考虑轧辊与轧件的弹性压缩，其接触面积的确定也是比较困难的，这是因为轧件从一个轧辊出来后又进入另一个轧辊时，轧件轴向要前进一段距离。而这个前进距离的确定是比较困难的，但是可以通过轧辊孔型的形状、变形特点、轧辊倾角 α 及螺旋孔型的升角 β 近似确定。

如果轧件每转半圈的轴向前进量与轧辊凸棱随孔型螺旋角度的关系已知时，那么接触面积是可以近似求得的。

斜轧钢球的接触面积如图 5.3-26 所示。

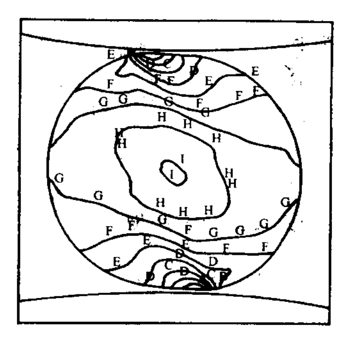
接触面积 F 为

$$F=\int_0^{x_0} b(x)\mathrm{d}x \tag{5.3-31}$$

由于接触宽度 b 与 x 的解析关系式不易确定，故一般用有限矩形面积之和求得。

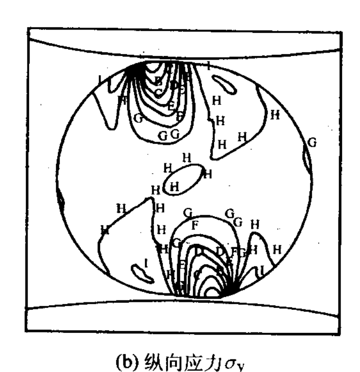
$$F=\sum_{i=0}^{n}\frac{b_i+b_{i+1}}{2}\Delta x_i \tag{5.3-32}$$





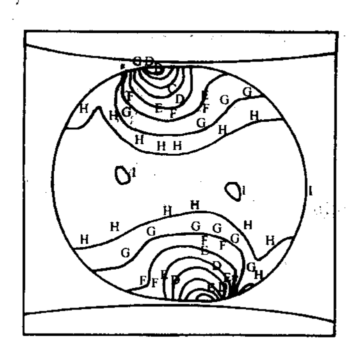
SX
A=−215
B=−178.375
C=−141.75
D=−105.125
E=−68.5
F=−31.875
G=4.75
H=41.375
I=78

(a) 横向应力σ_x



SY
A=−258
B=−225.744
C=−193.488
D=−161.231
E=−128.975
F=−96.719
G=−64.462
H=−32.206
I=.05

(b) 纵向应力σ_y



SZ
A=−229
B=−192.875
C=−156.75
D=−120.625
E=−84.5
F=−48.375
G=−12.25
H=23.875
I=60

(c) 轴向应力σ_z

SEQV
A=68.827
B=76.474
C=84.122
D=91.769
E=99.416
F=107.064
G=114.711
H=122.359
I=130.006

(d) 等效应力$\bar{\sigma}$

图 5.3-22 轧辊转动180°轧件横截面上的应力场

$\psi=50\%$ $d_0=40$ mm $L_1=40$ mm $\theta=360°$

4.2 接触面上的单位压力

斜轧接触面上的单位压力及其分布是个相当复杂的问题，至今尚未得到精确解公式。这里推荐用滑移线方法求接触面上平均单位压力。

在求解这个问题时做了如下的假设：

1）轴向没有变形，看作圆柱体平面应变问题；

2）把轧辊与轧件的接触弧线近似看作直线；

3）忽略摩擦力，并看作均布压力垂直作用于轧件。

这样简化后，轧件截面上的滑移线场如图5.3-27所示。其滑移线场可以用四部分组成：一个等腰三角形、两个扇形和一个曲线四边形。

沿图5.3-27Ⅰ—Ⅰ轴线剖开后，按静力学平衡条件$\sum Y=0$可以得到

$$\int_0^r \sigma_y \mathrm{d}x=0 \tag{5.3-33}$$

式中，σ_y为Ⅰ—Ⅰ断面上的水平应力；r为坯料的半径。

为了确定σ_y，我们研究两个正交滑移线AB与BC，按汉基第一定理得

$$\begin{cases}\sigma_A-\sigma_B=-2k\alpha_{AB}\\ \sigma_B-\sigma_C=2k\alpha_{AB}\end{cases} \tag{5.3-34}$$

式中，σ_A为滑移线场中A点的平均应力；σ_B为滑移线场中B点的平均应力；σ_C为滑移线场中C点的平均应力；k为纯剪切时的塑性变形阻力；α_{AB}为滑移线上A和B点、B和C点切线之间的夹角；α_{BC}为滑移线上A和B点、B和C点切线之间的夹角。

因为滑移线BC在C点的切线与Ⅰ—Ⅰ断面线成45°角，滑移线EB在E点的切线也与Ⅰ—Ⅰ断面线成45°角，设滑移线DE与DB夹角为β，那么

$$\alpha_{BC}=-\alpha_{EB}=-\alpha_{AB}=\beta \tag{5.3-35}$$

这样，方程式（5.3-34）就可以改写成

$$\sigma_A-\sigma_C=2k(\alpha_{BC}-\alpha_{AB})=4k\beta \tag{5.3-36}$$

A、C两点的平均应力还可以运用塑性方程式写成

$$\begin{cases}\sigma_A=p-k\\ \sigma_C=\sigma_y+k\end{cases} \tag{5.3-37}$$

根据式（5.3-36）、式（5.3-37）可以找出σ_y的关系式

$$\sigma_y=p-2k(1+2\beta) \tag{5.3-38}$$

将式（5.3-38）代入式（5.3-33）后得

$$\int_0^r [p-2k(1+2\beta)]\mathrm{d}x=0 \tag{5.3-39}$$

x在$(r-\frac{b}{2})\sim r$区域内，σ_y为常数，其值为

$$\sigma_y=p-2k$$

x在$0\sim(r-\frac{b}{2})$区域内，σ_y为变量，其值为

$$\sigma_y=p-2k(1+\beta)$$

所以，式（5.3-39）可以改写成

$$\frac{b}{2}(p-2k)+\int_0^{r-\frac{b}{2}}[p-2k(1+2\beta)]\mathrm{d}x=0 \tag{5.3-40}$$

式中，b为接触面宽度。

由此得到

$$p=2k\left[1+\frac{2}{r}\int_0^{r-\frac{b}{2}}\beta \mathrm{d}x\right] \tag{5.3-41}$$

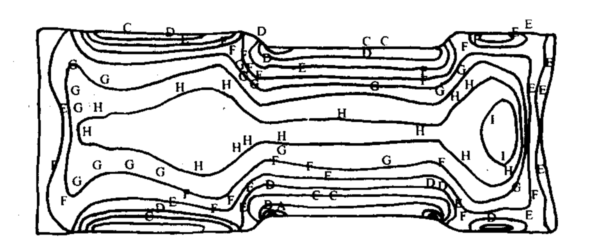
当β在$0\sim\frac{\pi}{4}$范围内，β值的近似函数关系为

$$\beta=-0.535+0.6\eta-0.065\eta^2 \tag{5.3-42}$$

式中，$\eta=\frac{2x}{b}$。

当β在$\frac{\pi}{4}\sim\frac{\pi}{2}$范围内，$\beta$值的近似函数关系为

$$\beta=0.15+0.2\eta-0.007^2 \tag{5.3-43}$$

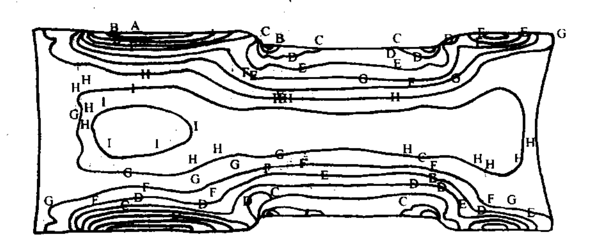


SX
A=−254
B=−207.139
C=−160.279
D=−113.418
E=−66.558
F=−19.697
G=27.164
H=74.024
I=120.885

(a) 横向应力σ_x

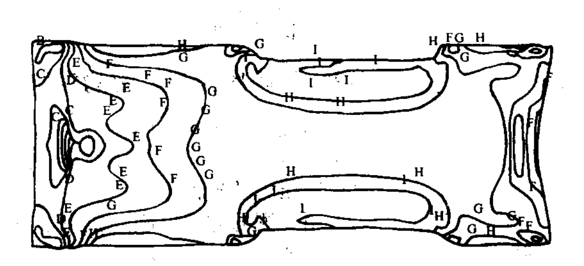
SY
A=−258.246
B=−219.715
C=−181.184
D=−142.654
E=−104.123
F=−65.592
G=−27.061
H=11.469
I=50

(b) 纵向应力σ_y



SZ
A=−229
B=−191.774
C=−154.547
D=−117.32
E=−80.094
F=−42.868
G=−5.641
H=31.586
I=68.812

(c) 轴向应力σ_z



SEQV
A=20
B=32.75
C=45.5
D=58.25
E=71
F=83.75
G=96.5
H=109.25
I=122

(d) 等效应力$\bar{\sigma}$

图 5.3-23 轧辊转动 180°轧件纵截面上的应力场

$\psi=50\%$ $d_1=40$ mm $L_1=40$ mm $\theta=360°$

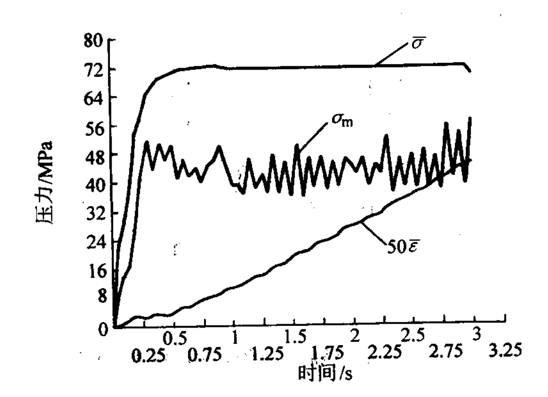


图 5.3-24 横截面中心点应力与应变

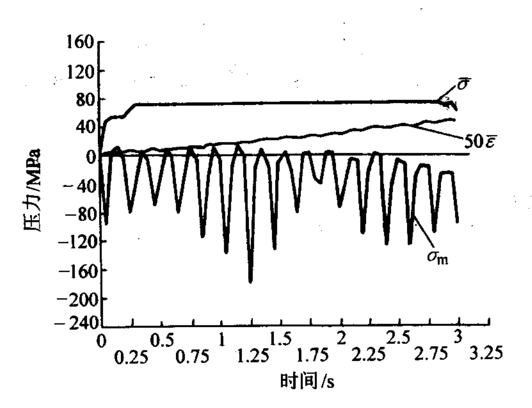


图 5.3-25 横截面边缘点应力与应变



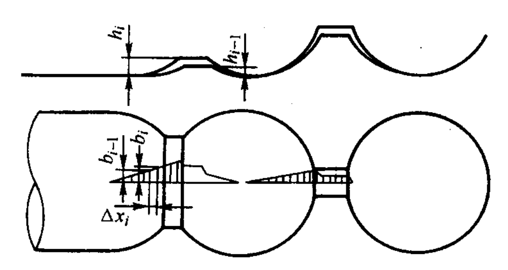


图 5.3-26 斜轧钢球的接触面积

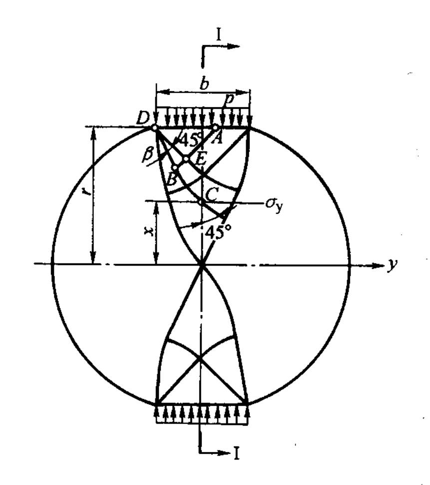


图 5.3-27 圆柱体压缩时的滑移线场

将式（5.3-42）及式（5.3-43）代入式（5.3-41）得到接触面上的单位压力公式为

当 β 在 $0\sim\frac{\pi}{4}$，即 $\frac{2r}{b}=1\sim3.64$ 时

$$p\approx2k\left[0.5\frac{b}{2r}+0.6\frac{2r}{b}-0.04\left(\frac{2r}{b}\right)^2\right] \quad (5.3\text{-}44)$$

当 β 在 $\frac{\pi}{4}\sim\frac{\pi}{2}$，即 $\frac{2r}{b}=3.64\sim8.4$ 时

$$p\approx2k\left[1.3-\frac{b}{2r}+0.2\frac{2r}{b}-0.04\left(\frac{2r}{b}\right)^2\right] \quad (5.3\text{-}45)$$

当 $\beta>75.8°$ 时，即 $\frac{2r}{b}>8.4$ 时

$$p\approx2k\left(1+\frac{\pi}{2}\right)\approx5.14k \quad (5.3\text{-}46)$$

平均单位压力 p 与接触面积 F 的乘积就是轧制总压力。

4.3 轧制力的方向

在求出接触面积与接触面上单位压力后，轧制压力就可以确定了。当轧制压力的作用位置方向确定后，轧制力矩也就可以确定了。

(1) 简单横轧轧辊上的作用力的方向

图 5.3-28 为简单横轧时轧辊上的作用力。

简单横轧是指两个轧辊的辊径与转速相等，忽略导板和轧件自重的影响，此时作用于两个轧辊的轧制压力 P 的连线应通过轧件中心，它与水平线的夹角为 $\frac{\varphi}{2}$，作用点近似为接触弧宽度 b 的中点。

轧制压力 P 可以分解成水平力 P_x 与垂直力 P_y

$$\begin{cases}P_x=P\cos\frac{\varphi}{2}\\P_y=P\sin\frac{\varphi}{2}\end{cases} \quad (5.3\text{-}47)$$

夹角 φ 可用下式近似计算

$$\varphi=2\arctan\frac{b}{d}$$

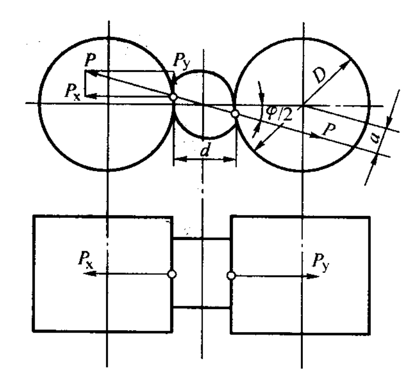


图 5.3-28 简单横轧时轧件作用于轧辊上力及力的方向

驱动一个轧辊所需的力矩（包括轧制与轴承摩擦力矩）M 为

$$M=P\left(\frac{D+d}{2}\sin\frac{\varphi}{2}+\mu_1R_1\right) \quad (5.3\text{-}48)$$

式中，μ_1 为轧辊轴承处的摩擦系数；R_1 为轧辊轴颈的半径。

(2) 孔型斜轧轧辊上作用力的方向

孔型斜轧虽然有轴向前进运动，但在一般情况下轧辊轴承并不受轴向力，只是在下列情况下才受轴向力。

1) 用带顶头的顶杆轧制空心轧件时。

2) 两个轧辊的孔槽轴向严重错位时。

3) 用推杆将坯料推入轧辊并撞击时。

通常情况下，轧辊受轴向力是很小的，故一般设计都不予考虑。

孔型斜轧中的轧件，一般情况下除受径向压力外，还受较大的轴向力，但轴向力是平衡的，不再作用于轧辊的轴承。

因此，一般孔型斜轧的轧辊上的作用力与简单横轧基本一致，这里不再重叙。

4.4 轧制压力与力矩的实验

斜轧是一个复杂的弹塑性变形过程，尽管人们在理论上作了大量工作，但目前还没有一种可靠而精确的确定接触面上单位压力的理论公式。

用实测的方法可确定轧制压力。

斜轧钢球时，一般没有轴向力，只有轧制压力 P，如图 5.3-29 所示。它通过轧件的中心与水平线的夹角为 $\varphi/2$。在两个轧辊的轴心处加上一对大小相等、方向相反，数值与轧制力 P 一样并与它平行的力。那么，轧件给轧辊的压力与 P 与 P'' 组成一个力偶，与电动机通过减速机、齿轮座、万向接轴传来的力矩相平衡。因此，还剩下两个分别作用于两个轧辊轴心处的 P 力，一个倾斜向上，一个倾斜向下，其倾角为。

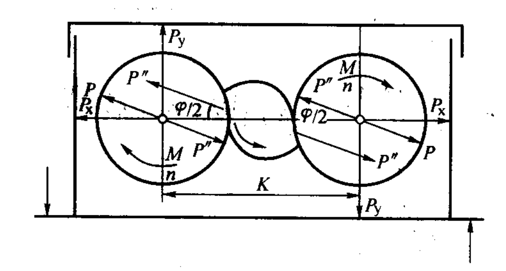


图 5.3-29 斜轧钢球时作用于轧辊和机架上的外力

将这两个 P、P'' 力分解为水平力 P_x 与垂直力 P_y。P_x 通过两边的轴承传给轴承箱，再经过压下螺钉螺母传递给机



架，这个力可以通过装在压下螺钉头部与轧辊箱之间的两个压头测出。

P_y 值可在斜轧机上放置压头直接测出。

根据测得的 P_x 与 P_y 就可以确定 P 力的大小与方向。

$$\begin{cases} P=\sqrt{P_x^2+P_y^2} \\ \dfrac{\varphi}{2}=\arctan\dfrac{P_y}{P_x} \end{cases} \tag{5.3-49}$$

也可根据测得的扭矩 M 确定 P 力的大小与方向。

因为

$$2M=P_y(D+d)$$

故

$$P_y=\frac{2M}{D+d} \tag{5.3-50}$$

式中，M 为作用于一个轧辊上的扭矩(忽略轧辊轴承上摩擦力矩)；D 为轧辊孔型底部直径；d 为轧件外径。

将式(5.3-50)代入式(5.3-49)后整理得

$$\begin{cases} P=\sqrt{P_x^2+\dfrac{4M^2}{(D+d)^2}} \\ \dfrac{\varphi}{2}=\arctan\dfrac{2M}{P_x(D+d)} \end{cases} \tag{5.3-51}$$

表 5.3-2 为球磨钢球的实测数据。

表 5.3-2　轧制压力与偏角

钢球直径 /mm	温度 /℃	孔型头数	轧辊倾斜角	钢种	测出的 P_x /10^4 N	测出的 M /10^4 N·m	计算的 P_y /10^4 N	计算的 P /10^4 N	$\frac{P_y}{P_x}$	$\frac{\varphi}{2}$
62	1 200	1	3°30′	65Mn	13.3	0.78	3.4	13.7	0.256	14°22′
	1 100	1	3°30′	65Mn	15.6	1.08	4.7	16.3	0.300	16°42′
	1 000	1	3°30′	65Mn	20.0	1.40	7.1	21.2	0.302	16°48′
	900	1	3°30′	65Mn	25.2	1.83	8.7	26.7	0.346	19°05′
	1 100	2	3°30′	65Mn	25.3	1.60	7.8	26.5	0.304	16°55′
	1 000	2	3°30′	65Mn	34.7	1.83	8.7	35.7	0.250	14°02′
	900	2	3°30′	65Mn	46.6	2.37	10.3	47.7	0.288	12°51′
80	1 200	1	3°30′	65Mn	19.1	1.08	4.7	19.7	0.246	13°49′
	1 000	1	3°30′	65Mn	40.0	2.08	9.1	41.0	0.228	12°51′
	900	1	3°30′	65Mn	47.7	2.69	11.7	49.1	0.246	13°49′
	900	1	3°30′	40Cr	46.2	2.69	11.7	47.7	0.254	14°15′
	900	1	3°30′	45	43.1	236	10.3	44.3	0.238	13°23′
100	1 200	1	3°30′	65Mn	33.9	1.40	7.1	34.7	0.182	10°19′
	1 100	1	3°30′	65Mn	43.1	1.83	8.7	44.0	0.202	11°25′
	1 000	1	3°30′	65Mn	54.3	2.26	9.9	55.2	0.182	10°19′
	900	1	3°30′	65Mn	95.5	3.90	17.0	97.2	0.178	10°05′
	1 000	1	3°30′	65Mn	70.0	3.20	13.9	71.4	0.198	11°23′
120	1 100	1	3°30′	45Mn	86.3	4.70	13.6	87.4	0.158	8°59′
	1 000	1	3°30′	45Mn	103.3	6.50	18.8	104.7	0.182	10°19′
	900	1	3°30′	45Mn	159.0	10.20	29.6	161.7	0.186	10°32′
	900	1	3°30′	45Mn	188.0	11.90	34.6	191.2	0.185	10°29′
	1 000	1	2°0′	45Mn	54.0	3.60	10.4	55.2	0.194	10°59′
	1 000	1	4°30′	45Mn	133.0	8.80	25.6	135.8	0.192	10°52′

5　模具设计

5.1　模具设计一般原则

螺旋孔型模具设计与楔横轧相同，除应满足旋转条件与疏松条件外，还应遵循两个基本原则。

1）体积相等原则。体积相等原则是孔型斜轧模具设计最重要最基本的原则。体积相等原则为：在封闭孔型区段内，任何位置孔型内所包含的金属体积应保持为一个常数，此常数为需轧出产品的体积加上一个不大的连接颈体积。

为了说明这一原则，我们以钢球孔型为例，如图 5.3-30 所示，表示两轧辊在任意位置所形成的孔型。

棒料从左边咬入，轧成钢球后从右边出来。

封闭孔型内包含五部分体积，应等于轧出钢球的体积加上最终连接颈体积，用 V_0 表示，其表达式为

$$V_{a\alpha}+V_{c\alpha}+V_{s\alpha}+V_{c\alpha+360}+V_{a\alpha+360}=V_0 \tag{5.3-52}$$

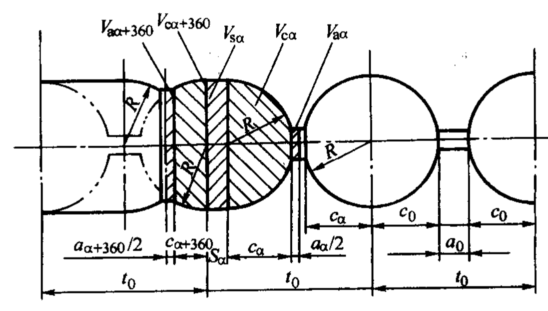


图 5.3-30　任意位置钢球孔型法向剖面图

式中，$V_{a\alpha}$、$V_{a\alpha+360}$ 分别为前后连接颈的体积（相差 360°）；$V_{c\alpha}$、$V_{c\alpha+360}$ 分别为前后球台的体积（相差 360°）；$V_{s\alpha}$ 为平直部分的圆柱体积。

如果式（5.3-52）中左边的体积和大于右边的体积，在孔型中出现多余金属，这样可能出现疏松及不旋转等问题。



如果式（5.3-52）中左边的体积和大于右边的体积，在孔型中出现金属不够，这将可能出现提前拉断、缩颈以及产品体积不够等问题。

2）连接颈相适应原则。连接颈相适应原则为：在任意位置，凸棱宽度与连接颈长度相适应。即 $a_\alpha = b_\alpha$。

为了说明这一原则，我们仍用钢球孔型任意位置两个轧辊所形成的凸棱来说明。

斜轧孔型特点，自咬入直至成形终了，凸棱逐渐升高，型腔逐渐稍有增大。当凸棱升高时，连接颈直径被轧细、展宽，稍稍扩大的型腔亦需要从连接颈补充必要的金属，如图5.3-31所示，该图表示相差90°轧辊凸棱的关系，即 $\alpha+90°$ 位置连接体积变化为 α 位置时，其连接颈宽度 b_α 应与 α 角的凸棱宽度 a_α 相适应。则当凸棱高度由 $h_{\alpha+90}$ 升至 h_α，凸棱两侧型腔增大 $2(V_{c\alpha}-V_{c\alpha+90})$ 连接颈体积 $2V_{a\alpha+90}$ 一部分补充扩大到型腔里，剩下的部分构成 $2V_{a\alpha}$，由此可建立以下平衡式

$$2V_{a\alpha+90} = 2V_{a\alpha} + 2(V_{c\alpha} - V_{c\alpha+90}) \qquad (5.3\text{-}53)$$

式中，$V_{a\alpha}$、$V_{a\alpha+90}$ 分别为前后连接颈的体积（相差90°）；$V_{c\alpha}$、$V_{c\alpha+90}$ 分别为前后球台的体积（相差90°）。

$$a_\alpha = \frac{8[V_{a\alpha+90} - (V_{c\alpha} - V_{c\alpha+90})]}{\pi d_\alpha^2} \qquad (5.3\text{-}54)$$

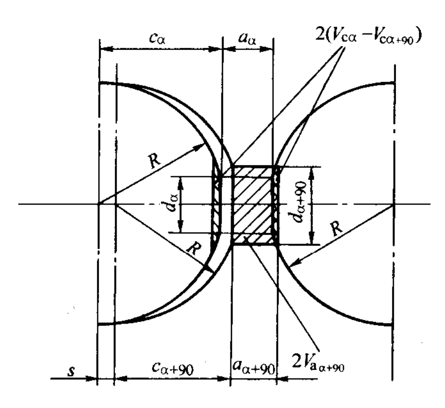


图5.3-31　连接颈体积适应图

根据连接颈相适应原则

$$b_\alpha = a_\alpha = \frac{8[V_{a\alpha+90} - (V_{c\alpha} - V_{c\alpha+90})]}{\pi d_\alpha^2} \qquad (5.3\text{-}55)$$

孔型设计体积相等原则，是从总体上要求任意型腔内金属平衡；连接颈相适应原则是从局部提出进一步要求，保证任意位置 $a_\alpha = b_\alpha$，也是建立在金属体积平衡基础之上的。

如果凸棱宽度 a_α 大于连接颈长度 b_α，则连接颈受拉，严重时被拉断，使轧件在孔型中处于不稳定状态。

如果凸棱宽度 a_α 小于连接颈长度 b_α，则出现连接颈金属多余，这种情况发生在未封闭孔型处时，由于连接颈的后伸，将后一个球推离凸棱，造成钢球前半部短金属的缺陷；这种情况发生在封闭孔型处时，多余金属使连接颈变扁，既可能出现不旋转，又可能出现强迫将其扭断现象，还可能出现疏松等缺陷。连接颈的疏松与中空会迅速向钢球扩展，造成钢球心部的疏松乃至中空。

孔型设计体积相等原则和连接颈相适应原则，二者相辅助相成，对一般斜轧孔型设计是普遍适用的。然而不同的产品制件，由于其几何形状的不同，应导出相应的计算公式，并根据不同的情况，综合运用。

5.2　孔型参数确定

(1) 轧辊基本参数的确定

1）轧辊直径 D。在保证轧件旋转条件及轧辊孔型允许的螺旋升角条件下，轧辊直径 D 应尽可能取小值。一般 D 与 ϕ（坯料直径）的关系为

$$D \geqslant (5 \sim 7)\phi$$

对于长度与直径比不大的异形件，依上式确定轧辊直径 D 即可。

对于那些长度与直径比较大的零件，或采用多头螺旋轧制，为了获得良好的成形条件，要求螺旋升角 β（相应的轧辊倾角 α）小些为佳，通常限定 $\beta \leqslant 5°$，最大不得超过7°。因此有如下公式确定轧辊直径

$$D = \frac{T_0}{\pi\tan\beta} = \frac{zt_0}{\pi\tan\beta} = \frac{z(l_0 + a_0)}{\pi\tan\beta} \qquad (5.3\text{-}56)$$

式中，T_0 为螺旋孔型的基本导程，mm；β 为螺旋孔型升角，°；t_0 为孔型螺距，mm，$t_0 = l_0 + a_0$；z 为螺旋头数，为正整数；l_0 为孔型法向长度，mm，近似轧件长度；a_0 为精整区孔型凸棱宽度，mm。

2）孔型螺旋圈数 n。在保证不超过极限压下量 Z' 及凸棱磨损寿命的条件下，应尽可能取小值。一般 n 取

$$n \geqslant 2\frac{3}{4} \sim 3\frac{3}{4}$$

即990°～1 350°。

3）轧辊长度 L

$$L = nT_0 + \Delta l \qquad (5.3\text{-}57)$$

式中，Δl 为轧辊咬入长度，视轧件长度而定，一般 Δl = 20～30 mm。

(2) 热轧件、孔型精整区型腔结构以及数据选择

斜轧轧制件可分为三类：精轧件、半精轧件和粗制毛坯。精轧件轧后不再加工，直接使用；半精轧件轧后需磨削或精车；毛坯件需经切削加工，或为模段提供精制毛坯。其中用途广且具有代表性的为半精轧件。下面介绍半精轧件孔型法向结构参数选择。

1）热轧件的结构尺寸

① 轧件各部分直径 d_n

$$d_{nQ} = K_d(d_n + \Delta d_n) \qquad (5.3\text{-}58)$$

式中，d_n 为轧件各部分的成品长度；Δd_n 为长度方向的加工余量；K_d 为热膨胀系数。

② 轧件各部分长度 l_n

$$l_{nQ} = K_l(l_n + \Delta l_n) \qquad (5.3\text{-}59)$$

式中，l_n 为轧件各部分的成品直径；Δl_n 为直径方向的加工余量；K_l 为热膨胀系数。

2）孔型的法向断面尺寸。精整区孔型法向断面结构同热轧件是相互吻合的，其形状尺寸确定与热轧件基本相同。

(3) 经验数据的选择

1）精整部分连接颈直径 d_0。精整部分连接颈直径 d_0 取得越小，最终连接颈损失的金属越小，但连接颈相适应的第二原则越难满足，并且造成导板工作面窄的问题及成形区接近封闭的凸棱太薄，严重地影响轧辊的寿命。一般 d_0 可按经验公式确定（d_{max} 为轧件最大直径）

$$d_0 = (0.18 \sim 0.22)d_{max}$$

钢球孔型设计时，连接颈直径 d_0 可参考经验数据表5.3-3选取。

2）成形终了凸棱高度 h_0。成形终了凸棱高度 h_0 可由几何关系求得

$$h_0 = \frac{1}{2}(d_{max} - d_0)$$

3）凸棱起始高度 h_b。确定凸棱起始高度 h_b 应考虑以下两个因素：确定良好的轧制旋转条件和有利于第二原则的



表 5.3-3　斜轧钢球孔型经验数据表　mm

坯料直径 ϕ	20～30	30～40	40～50	50～60	60～80	80～100	100～125
精整部分连接颈直径 d_0	2.2～2.8	2.8～3.4	3.4～4.0	4.0～5.5	5.5～7.5	7.5～10	10.0～12.0
精整部分凸棱宽度 a_0	2.8～4.0	3.5～5.5	4.5～6.5	5.0～7.0	6.0～7.5	6.5～8.0	7.0～9.0
孔型开始咬入第一圈凸棱宽度 a	1.2～1.8	1.6～2.2	2.0～2.4	2.2～2.6	2.4～2.8	2.6～3.0	2.8～3.2
孔型凸棱起始高度 h_b	1.0～1.8	1.4～2.4	2.0～3.2	2.8～3.6	3.0～3.8	3.4～4.0	3.5～4.2

要求。h_b 取小值，对旋转条件有利；h_b 取大值，对第二原则的要求容易满足。因此，在满足旋转条件的前提下，h_b 应尽量取较大的值。h_b 的经验数据列于表 5.3-3 中。

4）精整部分凸棱宽度 a_0。精整区凸棱宽度应满足强度要求，同时应有利于第二原则。按表 5.3-3 中选取。

5）孔型开始咬入第一圈凸棱宽度 a。第一圈凸棱宽度 a，按表 5.3-3 中选取。

6）坯料直径 ϕ。坯料直径的选择取决于轧件结构和成形方案。一般坯料直径为：

$$\phi=(1-k_d)d_{max} \tag{5.3-60}$$

式中，k_d 为轧制扩颈率；d_{max} 为轧件最大直径。

5.3　孔型设计方法

在螺旋孔型斜轧球类件中，以钢球的单头孔型设计比较简单并具有典型性，所以以单头钢球孔型设计为例，阐述其孔型设计的方法与思路。

斜轧钢球孔型设计方法较多，常用以下方法。

（1）孔型凸棱单侧变导程法

孔型凸棱单侧变导程法又称柱面辊孔型设计法，是建立在圆柱形轧辊坯上设计加工的方法，是前苏联设计的热轧钢球的方法。由于轧辊孔型可以在普遍车床上加工，因而是目前广泛采用的基本方法。它不仅适用于形状简单的钢球、滚子等，而且适用于形状复杂的导形零件，如 Q－7 球头、H－1 阶梯轴等。

1）其孔型特点　①单侧变导程，另一侧为基本导程。如图 5.3-32 所示，凸棱左侧导程 T 是随孔型展角变化的，而右侧导程为不变的基本导程 T。②凸棱宽度由窄变宽。凸棱宽度从入料口到出料口是由窄变宽的，在孔型未封闭的第一圈及精整区，孔型的凸棱宽度可以是不变的。③轧辊制造较容易，可以在普通车床上用变换挂轮的方法加工，因而对制造设备的要求不高，成球的几何精度也不够高。

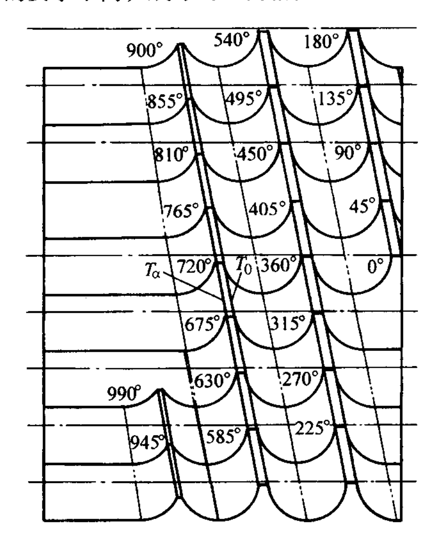


图 5.3-32　ϕ50 mm 球磨球孔型展开图示意图

2）设计思路。凭经验选取好孔型基本参数、孔型半径、孔型螺旋头数和凸棱升高规律（要满足旋转条件），凸棱宽度，由基本导程求孔型各处平直圆柱长度，然后计算出多余金属系数和棱宽与连接颈的差值，若检查不满足第一、二原则时，再修正凸棱宽度，再计算验证，直到满足为止。

3）单侧变导程法孔型设计的主要原理与步骤

① 根据产品规格选取孔型基本参数。成品球半径、成形区长度、精整区长度、连接颈终了直径、精整区凸棱宽度、起始凸棱高度、计算等分间隔角度 φ。

② 确定基本导程 T_0

$$T_0=2C_0+a_0 \tag{5.3-61}$$

对于单头孔型，基本导程即为基本螺距 t_0 应选择机床上的螺距，若有微小差异，可调整 a_0。速控车床可随意。

③ 确定凸棱高度 h 与 α 角的关系。已知起始凸棱高度 h_0 与精整部分连接颈直径 d_0，就可确定每个 α 角位置的凸棱高 h_α（图 5.3-33）。

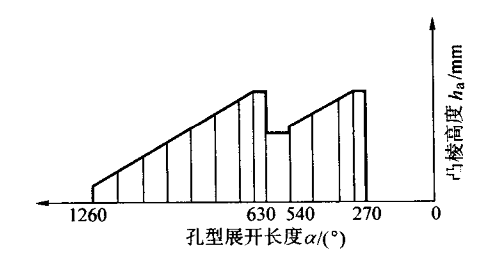


图 5.3-33　凸棱高度变化图

h_α 也有采用两段式的，甚至做成曲线变化的，这样做的好处是连接颈相适应的原则容易满足，但加工麻烦。

h_α 与 α 的直线变化关系是靠机床自动横进刀完成，也可以用专门的靠模板完成。如果是曲线变化，则需要数控机床或液压仿形完成。

④ 确定凸棱宽度 a 与 α 角的关系。成形区凸棱宽度可根据经验初选，经计算后确定，一般只作微量修正。

⑤ 确定平直段 s_α 的值。从图 5.3-33 中可知，存在下列关系

$$s_\alpha=T_0-2c_\alpha-a_\alpha \tag{5.3-62}$$

其中 c_α 为任意位置球台高度，亦即圆弧水平投影长度。

$$c_\alpha=\sqrt{R^2-(R-h_\alpha)^2} \tag{5.3-63}$$

⑥ 校核多余金属系数 K 值。因头一圈孔型尚未封闭，故不需要校核。只校核孔型封闭之后的部分。由于按经验选取的 a_α，第一原则不能完全保证，这样就会出现多余金属，用多余金属系数 K 表示之

$$K_{V\alpha}=\frac{V_{a\alpha}+V_{c\alpha}+V_{s\alpha}+V_{c\alpha+360}+V_{a\alpha+360}}{V_0} \tag{5.3-64}$$

式中　$$V_{a\alpha}=\frac{\pi d_\alpha^2}{4}\times\frac{a_\alpha}{2} \tag{5.3-65}$$

$$V_{c\alpha}=\pi c_\alpha\left(R^2-\frac{c_\alpha^2}{3}\right) \tag{5.3-66}$$



$$V_{s\alpha} = \pi R^2 S_\alpha \tag{5.3-67}$$

$$V_{c\alpha+360} = \pi c_{\alpha+360}\left(R^2 - \frac{c_{\alpha+360}^2}{3}\right) \tag{5.3-68}$$

$$V_{a\alpha+360} = \frac{\pi d_{\alpha+360}^2}{4} \times \frac{a_{\alpha+360}}{2} \tag{5.3-69}$$

$$V_0 = \frac{4}{3}\pi R^3 + \frac{\pi d_0^2}{4} \times a_0 \tag{5.3-70}$$

根据经验，在孔型刚封闭处的 K 值为

$$K = 0.98 \sim 1.03$$

⑦ 按连接颈相适应的第二原则计算 b_α，校核孔型设计第二基本原则满足程度计算 $|b_\alpha - a_\alpha|$ 的值

$$2V_{a\alpha+\varphi} = 2V_{a\alpha} + 2(V_{s\alpha} - V_{c\alpha+\varphi}) \tag{5.3-71}$$

式中，$V_{a\alpha} = \dfrac{\pi d_\alpha^2}{4} \times \dfrac{b_\alpha}{2}$ (5.3-72)

$$V_{a\alpha+\varphi} = \frac{\pi d_{\alpha+\varphi}^2}{4} \times \frac{a_{\alpha+\varphi}}{2} \tag{5.3-73}$$

$$V_{c\alpha+\varphi} = \pi c_{\alpha+\varphi}\left(R^2 - \frac{c_{\alpha+\varphi}^2}{3}\right) \tag{5.3-74}$$

上式中，除 b_α 外都是已知数，计算 b_α 的公式为

$$b_\alpha = \frac{8\left[V_{a\alpha+\varphi} - (V_{c\alpha} - V_{c\alpha+\varphi})\right]}{\pi d_\alpha^2} \tag{5.3-75}$$

式（5.3-75）计算得到的 b_α 与 a_α 进行比较，校核第二原则。

⑧ 修改 a_α 确定一个既保证第一原则又适应第二原则的 a'_α 值。重复⑤、⑥、⑦、⑧步直到满意为止。

⑨ 求解导程

精整区

$$T_\alpha = T_0 \tag{5.3-76}$$

成形区

$$T_\alpha = T_0 - \frac{360}{\varphi}(S_{\alpha+\varphi} - S_\alpha) \tag{5.3-77}$$

⑩ 绘制孔型导程图，孔型展开图。

(2) 孔型双侧同步变导程法

孔型双侧变导程法又称为锥面辊孔型设计法，凸棱高度是在锥形辊面上自然形成的，孔型设计与加工建立在锥面辊坯上，并且凸棱两侧导程均为变化的。是美国设计用于轧制较小直径的自行车钢珠。目前常用以设计冷轧直径 3～6.5 mm钢珠。采用双侧变导程设计方法的出发点是为了简化孔型加工。然而，凸棱顶为斜面，按体积平衡条件建立方程求得之凸棱宽度、螺旋导程等，变化规律并非简单的线性关系，不仅计算复杂，而且加工精度难以保证。鉴于轧辊 θ 及角凸棱宽度 a_α 值均不大，可将凸棱顶视为平直的，计算误差甚小，这样设计和制造就简单的多。

1) 其孔型特点。①无基本导程，球形型腔中无平直段存在，对球形底部来说只有一条变导程，对凸棱两侧来说是双侧变导程，且无基本导程。如图 5.3-34 所示。②凸棱宽度由宽一窄一宽，凸棱宽度的最窄处靠近切断区，之后凸棱宽度又增加了。③轧辊制造必须用专用机床，采用凸轮或液压等仿形法加工。辊坯的制造精度取决于加工工艺过程。

2) 设计思路。先凭经验选取孔型设计基本参数，确定凸棱升高规律，满足轧件咬入条件，然后由 $K_\alpha = 1$ 公式求出凸棱宽度，最后求出孔型螺旋型槽变化导程。

3) 孔型设计主要原理与步骤

① 根据产品规格选取设计基本参数。成品球半径、成形区长度、精整区长度、连接颈终了直径、连接颈终了长度、起始凸棱高度、计算等分间隔。

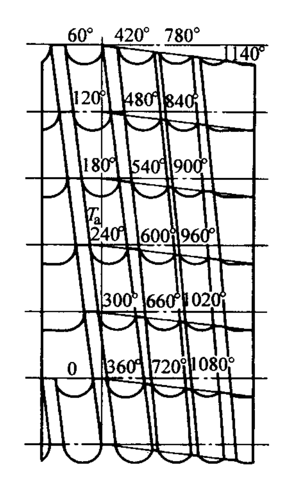


图 5.3-34　钢珠孔型展开示意图

② 确定凸棱升高规律。升高规律可根据设计经验来确定。对于冷轧自行车钢珠孔型凸棱高度，可以预先确定变化规律。实践证明，h_α 采用抛物线变化规律，即开始变化缓慢，接近成形终了时 h_α 急剧升高，对进一步提高轧件质量效果很好。其公式如下

$$h_\alpha = \left(\frac{a_\alpha - a_b}{a_0 - a_b}\right)^2 (h_0 - h_b) + h_b \tag{5.3-78}$$

式中，a_0、a_b 分别为对应孔型成形终了角度和起始角度；h_0、h_b 分别为最大及最小凸棱的高度。

③ 按第一原则确定凸棱宽度 a_α。按体积相等的第一原则，可建立以下等式（见图 5.3-35）

$$V_{a\alpha} + 2V_{c\alpha} = V_0 \tag{5.3-79}$$

式中各符号意义同前，其中 $d_\alpha = 2(R - h_\alpha)$。

将上式整理得

$$a_\alpha = \frac{3V_0 - 2\pi[2R^2 + (R - h_\alpha)^2]\sqrt{2Rh_\alpha - h_\alpha^2}}{3\pi(R - h_\alpha)^2} \tag{5.3-80}$$

上式表明凸棱宽度是高度的函数：$a_\alpha = f(h_\alpha)$。

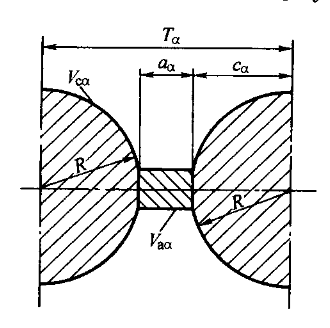


图 5.3-35　任意位置型腔内金属体积图

④ 求解导程。由图 5.3-35 可知，若将凸棱视为近似平直的，那么导程可用近似式求得

$$T_\alpha = a_\alpha + 2c_\alpha \tag{5.3-81}$$

将式（5.3-80）代入式（5.3-81）整理得到

$$T_\alpha = \frac{3V_0 - 4\pi[R^2 - (R - h_\alpha)^2]^{3/2}}{3\pi(R - h_\alpha)^2} \tag{5.3-82}$$

上式表明，T_α 亦为 h_α 的函数：$T_\alpha = f(h_\alpha)$。可见，当 h_α 确定之后，a_α、T_α 便可求得。

⑤ 绘制孔型导程图，孔型展开图。

(3) 孔型凸棱双侧不同步变导程法

孔型双侧不同步变导程法是由北京科技大学提出的，该设计方法兼收了孔型凸棱单侧变导程法和孔型双侧变导程法的优点，是这两种设计方法的发展。该方法能很好地满足第



一原则，较好地满足第二原则，适用于各种形状的零件设计，但加工工艺性差，必须在专用数控机床上进行加工。

1）其孔型特点。①双侧不同步变导程，凸棱两侧螺旋导程是变化的，但变化规律及变化量不等，如图5.3-36。②凸棱宽度由窄变宽。凸棱宽度从入料口到出料口是由窄变宽的。③轧辊制造难，必须在专用数控机床上进行加工。

2）设计思路。先凭经验选取孔型设计基本参数，由轧件咬入条件确定凸棱升高规律，预选凸棱宽度，然后由公式 $K_a=1$ 求出成形段各处圆柱平直段长度，然后计算出多余金属系数和棱宽与连接颈的差值，验算第二原则，再反复修正凸棱宽度，使参数尽量满足第二原则。

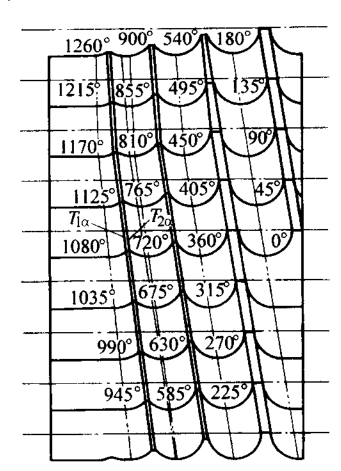


图5.3-36 铝球双侧不同步变导程孔型展开示意图

3）孔型设计主要原理与步骤

① 根据产品规格选取设计基本参数。成品球半径、成形区长度、精整区长度、连接颈终了直径、连接颈终了长度、起始凸棱高度、计算等分间隔。

② 确定基本导程 T_0

$$T_0=2c_0+a_0+s_0 \qquad (5.3\text{-}83)$$

③ 确定凸棱升高规律。由于采用数控加工，因而使升高规律的确定不受加工限制，最大程度地满足工艺要求，升高规律可根据设计经验来确定。

④ 确定凸棱宽度的变化规律。凸棱宽度的变化规律可根据经验确定，采取由小到大的变化规律，或直线变化规律，或抛物线变化规律，这个变化规律不受加工限制。可最大限度地满足工艺要求。

⑤ 其他孔型参数的确定

由 $K_a=1$ 可确定平直段长度为

$$s_a=\frac{V_0-(V_{a\alpha}+V_{c\alpha}+V_{a\alpha+360}+V_{c\alpha+360})}{\pi R^2} \qquad (5.3\text{-}84)$$

式中各符号意义同前。

⑥ 校核孔型设计第二基本原则满足程度，计算 $|b_a-a_a|$ 的值。

⑦ 修改 a_a 与 b_a 重复②、③、④、⑤、⑥步直到满意为止。

⑧ 求解导程。

精整区

$$T_{1a}=T_0$$

$$T_{2a}=T_0$$

成形区

$$T_{1a}=T_{2a}-\frac{360}{\varphi}[2(c_a-c_{a+\varphi})+a_a-a_{a+\varphi}] \quad (5.3\text{-}85)$$

$$T_{2a}=T_{1a-360}+\frac{360}{\varphi}(s_{a-360+\varphi}-s_{a-360}) \qquad (5.3\text{-}86)$$

⑨ 绘制孔型导程图，孔型展开图。

（4）多头螺旋孔型设计方法

多头螺旋孔型是指轧辊有两条或两条以上的螺旋孔型。目前生产中采用的有两头、三头和四头螺旋孔型，轧辊每转一转可以轧制两件至四件产品，效率成倍增长。

多头螺旋孔型设计原理、原则和方法，同单头孔型基本相同。但也还有其自身的特点。图5.3-37为 $\phi25$ 钢球的四头孔型展开图。下面就结合这一实例，分析多头孔型的特点。

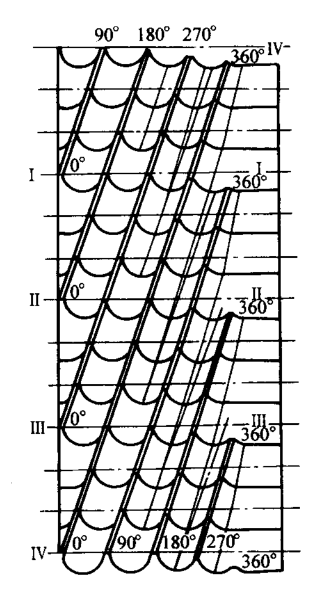


图5.3-37 $\phi25$ 钢球四头孔型展开示意图

1）多头螺旋孔型每相邻两条线间的角度 φ_z 由下式确定

$$\varphi_z=\frac{360°}{z}$$

式中，z 为螺旋头数，当 $z=4$ 时，则 $\varphi_4=90°$。

2）孔型型腔由相邻两螺旋凸棱构成。由此可知，孔型于 φ_z 度便开始封闭。

3）孔型总长度大为缩短。例如，四头孔型螺旋总长为360°。

4）孔型基本导程 T_0 加大为单头孔型导程的 z 倍。即

$$T_0=z(2c_0+a_0)$$

5）轧辊直径 D 加大。参看式（5.3-56）可知，当螺旋升角 β 确定之后，D 和 T_0 成正比。同单头相比，多头孔型导程成倍加大，因此轧辊直径必须相应地加大。此外，多头孔型螺旋总长度大为缩短，而增大辊径可增加螺旋展开长度，保持适当的单位压缩量。

6）计算等分间隔角度 φ 变小，增加了计算点。通常单头孔型按90°等分，两头按60°等分，四头孔型按30°等分进行计算。

多头螺旋孔型由于存在上述特点，在设计计算时应注意孔型于 φ_z 度便开始封闭，孔型基本导程变大，计算等分间隔角度 φ 变小。采用上述三种设计方法时，对其公式需作必要的修正。

式（5.3-64）应改写为

$$K_{V\alpha}=\frac{V_{a\alpha}+V_{c\alpha}+V_{s\alpha}+V_{c\alpha+\frac{360}{z}}+V_{a\alpha+\frac{360}{z}}}{V_0}$$

式（5.3-77）应改写为

$$T_a=T_0-\frac{360}{\varphi}(s_{a+\varphi}-s_a)=Z(2c_0+a_0)-\frac{360}{\varphi}(s_{a+\varphi}-s_a)$$

式（5.3-81）应改写为

$$T_\alpha = z(2c_\alpha + a_\alpha)$$

式（5.3-84）应改写为

$$S_\alpha = \frac{V_0 - (V_{a\alpha} + V_{c\alpha} + V_{a\alpha+\frac{360}{z}} + V_{c\alpha+\frac{360}{z}})}{\pi R^2}$$

式（5.3-86）应改写为

$$T_{2\alpha} = T_{1\alpha-\frac{360}{z}} + \frac{360}{\varphi}(s_{\alpha-\frac{360}{z}+\varphi} - s_{\alpha-\frac{360}{z}})$$

最后，因为多头孔型各条螺旋的变化规律相同，所以只需计算其中任意一条即可。这里，具体计算就不一一列举了。

5.4 模具设计实例

在孔型斜轧中，以钢球的设计比较简单并具有典型性，所以以 $\phi60$ 球磨钢球孔型设计为例，介绍斜轧钢球孔型设计。

（1）基本参数

1）钢球直径 ϕ　$\phi = 62.5$ mm

2）孔型半径 R　$R = \frac{1}{2}\phi K_Q = 31.56$ mm

3）棒料直径 ϕ_0　$\phi_0 = 60$ mm

4）螺旋孔型长度 α　取 $\alpha = 1\,080°$

5）轧辊直径 D　$D = (5 \sim 6)\phi \approx 300 \sim 360$ mm，取 $D = 350$ mm

6）基本导程 T_0　$T_Q^i = 2c_0 + a_0 = 68.99$ mm

7）轧辊长度 L　$L = \frac{\alpha}{360}T_0 + \Delta l = 240$ mm

8）精整区凸棱宽度 a　$a = 6$ mm

9）成形终了连接颈直径 d_0　$d_0 = 4.12$ mm

10）起始凸棱高度 h_b　$h_b = h_{1080} = 3.1$ mm

11）任意位置凸棱宽度 a_α　列于表 5.3-4。

（2）任意位置凸棱高度及连接颈直径

1）成形终了凸棱高度 h_0　$h_0 = R - \frac{1}{2}d_0 = 29.5$ mm

2）根据 h_b、h_0 作凸棱高度图 5.3-38 并计算横进刀量（每圈高度变化量）

$$T_x = \frac{h_0 - h_b}{\alpha_b - \alpha_0} \times 360° = \frac{29.5 - 3.1}{1\,080° - 540°} \times 360° \text{ mm/r} = 17.6 \text{ mm/r}$$

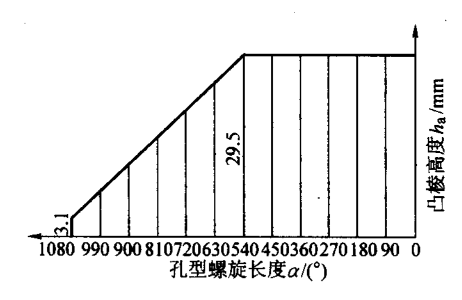


图 5.3-38 钢球孔型凸棱高度图

3）任意位置凸棱高度 h_α，例如 h_{900}

$$h_{900} = h_b + \frac{T_x}{360°}(1\,080° - 900°) = 3.1 \text{ mm} + \frac{17.6}{360°} \times 180° \text{ mm} = 11.9 \text{ mm}$$

其余计算省略，h_α 值列于表 5.3-4。

4）任意位置连接颈直径 d_α，例如 d_{900}

$$d_{900} = 2(R - h_{900}) = 2 \times (31.56 - 11.9) \text{ mm} = 39.32 \text{ mm}$$

其余 d_α 值列于表 5.3-4。

（3）校核孔型金属体积系数 K_V

1）计算钢球总体积 V_0

$$V_0 = \frac{4}{3}\pi R^3 + \frac{\pi}{4}d_0^2 a_0 = 131\,753.86 \text{ mm}^3$$

2）计算任意位置孔型内体积 V_α，例 V_{720}

$$V_{a720} = \frac{\pi}{4}d_{720}^2\frac{a_{720}}{2} = \frac{\pi}{4} \times 21.72^2 \times \frac{4.030}{2} \text{ mm}^3 = 746.59 \text{ mm}^3$$

$$V_{c720} = \pi C_{720}\left(R^2 - \frac{1}{3}C_{720}^2\right)$$

$$C_{720}^2 = R^2 - (R - h_{720})^2 = 878.09 \text{ mm}^2$$

$$C_{720} = 29.63 \text{ mm}$$

$$V_{c720} = 29.633\pi(31.56^2 - \frac{878.094}{3}) \text{ mm}^3 = 65\,476.90 \text{ mm}^3$$

$$V_{S720} = \pi R^2 S_{720} = \pi R^2(T_0 - 2C_{720} - a_{720}) = 31.56^2\pi(68.985\,4 - 2 \times 29.633 - 4.030) \text{ mm}^3 = 17\,802.88 \text{ mm}^3$$

$$V_{a1080} = \frac{\pi}{4}d_{1080}^2\frac{a_{1080}}{2} = \pi(R - h_{1080})^2\frac{a_{1080}}{2} = \pi(31.56 - 3.1)^2 \times \frac{3.144}{2} \text{ mm}^3 = 4\,000.11 \text{ mm}^3$$

$$V_{c1080} = \pi C_{1080}\left(R^2 - \frac{1}{3}C_{1080}^2\right)$$

$$C_{1080}^2 = R^2 - (R - h_{1080})^2 = 186.06 \text{ mm}^2$$

$$C_{1080} = 13.64 \text{ mm}$$

$$V_{c1080} = 13.640\pi(31.56^2 - \frac{186.062}{3}) \text{ mm}^3 = 40\,023.69 \text{ mm}^3$$

$$V_{720} = V_{a720} + V_{c720} + V_{S720} + V_{c1080} + V_{a1080} = 128\,050.18 \text{ mm}^3$$

3）$K_{V720} = \frac{V_{720}}{V_0} = \frac{128\,050.177}{131\,753.858} = 0.97$

校核结果，$K_{V\alpha}$值满足设计要求。其余验算省略，校核结果见表 5.3-4。

（4）校核连接颈长度 b_α 同凸棱宽度 a_α 的适应性

1）计算 b_{720}

$$b_{720} = 8[V_{a810} - (V_{c720} - V_{c810})]/\pi d_{720}^2$$

$$V_{a810} = \frac{\pi}{4}d_{810}^2\frac{a_{810}}{2} = 1\,208.56 \text{ mm}^3$$

$$V_{c810} = \pi C_{810}\left(R^2 - \frac{C_{810}^2}{3}\right) = 64\,365.84 \text{ mm}^3$$

$$V_{c720} = 65\,476.90 \text{ mm}^3$$

表 5.3-4 $\phi60$ 钢球孔型计算表　mm

α/(°)	h_α	d_α	a_α	c_α	s_α	V_α	$K_{V\alpha}$	b_α	$a_\alpha - b_\alpha$
1 080	3.1	56.92	3.14	13.64	38.56				
990	7.5	48.12	3.09	20.42	25.05				
900	11.9	39.32	3.04	24.69	16.57				
810	16.3	30.52	3.30	27.63	10.43				
720	20.7	21.72	4.03	29.63	5.69	128 050.18	0.97	0.53	3.50
630	25.1	12.92	5.21	30.89	1.99	130 159.64	0.99	6.56	-1.35
540	29.5	4.12	6.00	31.44	0.00	129 211.01	0.99	44.73	-38.73



$b_{720} = 8[1\ 208.562 - (65\ 476.897 - 64\ 365.836)]/1\ 482.073$ mm
$= 0.53$ mm

2）校核 $a_\alpha - b_\alpha$

$a_{720} - b_{720} = 4.030$ mm $- 0.53$ mm $= 3.50$ mm

即 $a_{720} > b_{720}$，连接颈受拉。但尚不致拉断，基本上是适应的。

其余校核结果列于表 5.3-4。

(5) 计算孔型加工导程 $T_{\alpha\sim\alpha+90}$

1）由 0°至 540°因凸棱宽度不变，故导程亦不变。即 $T_{0\sim540} = T_0 = 68.99$ mm

2）由 540°至 630°，$S_{540} = 0$。故

$T_{540\sim630} = T_0 - 4(S_{630} - S_{540}) = 68.99$ mm $- 4 \times 1.99$ mm
$= 61.03$ mm

3）由 630°至 720°

$T_{630\sim720} = T_0 - 4(S_{720} - S_{630})$
$= 68.99$ mm $- 4 \times (5.69 - 1.99)$ mm $= 54.19$ mm

其余计算见图 5.3-39。

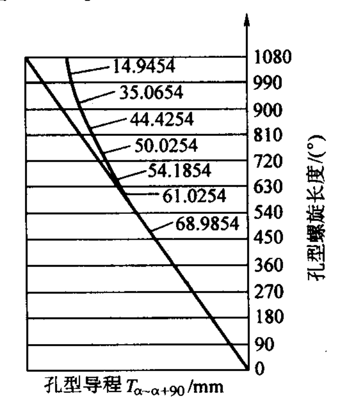


图 5.3-39 ϕ60 mm 钢球孔型导程示意图

6 机械设备

6.1 斜轧机的基本类型

目前，无论国内或国外，在斜轧机总体结构的配置上，可以分为两大类：一类是将电动机、传动装置及工作机座等分别安装在地基基础上；另一类是将电动机、传动装置及工作机座等配置在一起。前者是从轧制无缝钢管的斜辊式穿孔机发展来的，我们把这种类型的斜轧机称为穿孔式斜轧机。后者是从机器制造厂的机床，特别是从辊式无心磨床发展来的，我们把这种类型的斜轧机称为机床式斜轧机。除上述两种基本类型的斜轧机外，还有一种机架做成钳式、可调整的斜轧机，我们把它称为钳式斜轧机。

下面将分别介绍这三类斜轧机结构型式、优缺点及其运用范围。

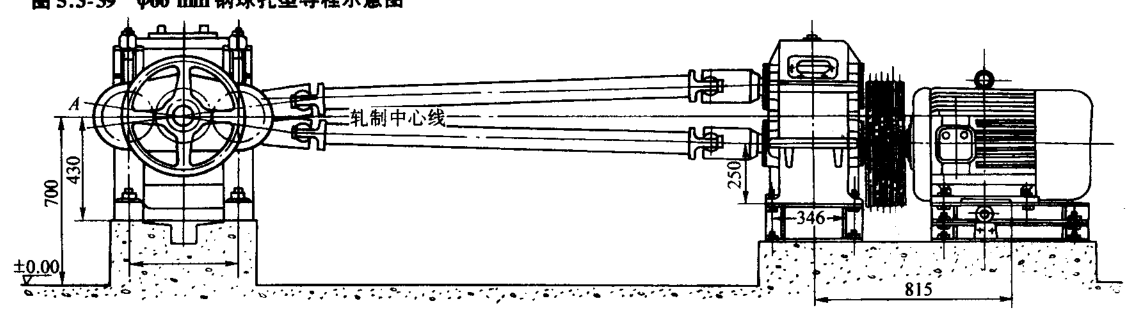
1）穿孔式斜轧机。穿孔式轧机见图 5.3-40。

穿孔式斜轧机的主要优点是：机器强度高、刚性大、使用可靠和维护方便。缺点是：由于轧机机座、万向联接轴、齿轮座减速机以及电机是分开配置的，故占地面积与设备重量大。所以，这种斜轧机适合于轧制尺寸大，而精度不高的产品。例如：轧制球磨机钢球、大尺寸轴承钢球和滚子、以及大尺寸异形零件毛坯等。

其主要技术特性列于表 5.3-5 中。

2）机床式斜轧机。它与穿孔式斜轧机不同，电动机、传动装置与轧辊装置都放在一个机座内，与一般冷加工机床类似，见图 5.3-41。机床式斜轧机的特点是：结构紧凑占地小、易于配置前后进出料装置以及轧机精度高等。缺点是维护检修困难、承载能力小等。

这种轧机多用于轧制尺寸小、精度要求高的产品，例如自行车钢珠、滚针等而且多为冷轧与温轧。



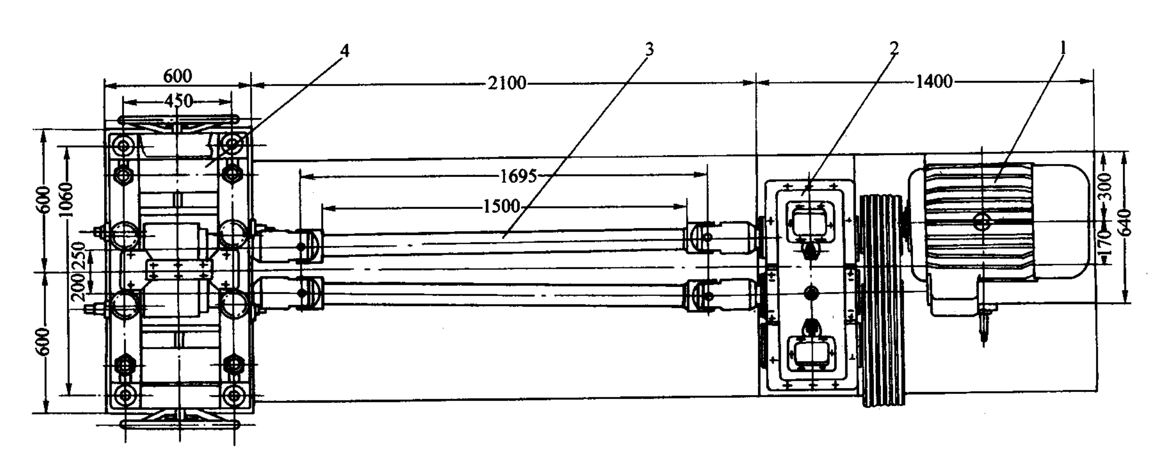


图 5.3-40 ϕ30 mm 钢球与滚子轧机

1—电动机；2—复合式减速齿轮座；3—万向联接轴；4—工作机座

表 5.3-5　穿孔式斜轧机主要技术参数（参考）

参数	ϕ20 钢球	ϕ30 钢球	ϕ40 钢球	ϕ60 钢球	ϕ80 钢球	ϕ100 钢球
钢球直径/mm	15 ~ 20	20 ~ 32	30 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	70 ~ 100
轧辊最大直径/mm	160	220	260	340	450	600
轧辊转速/r·min^{-1}	75	70	70	65	60	45
轧辊最大倾角/（°）	5	6	6	7	8	8
电动机功率/kW	30	37	90	180	450	650
轧机质量/t	1.5	3.0	7	16	27	50
外形尺寸 L/m × B/m × H/m	2.6×1.2×0.5	4.1×1.8×0.8	4.6×2.4×1.0	6.0×4.0×1.4	9.6×4.5×1.7	11.5×5.0×1.8

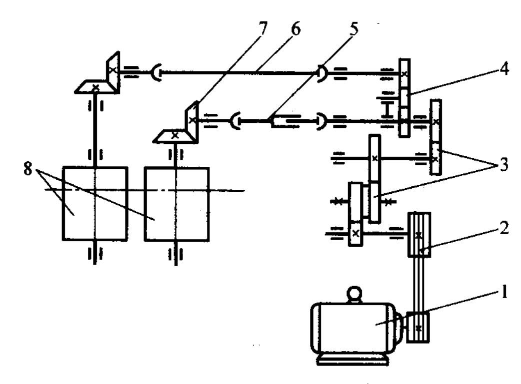


图 5.3-41　机床式斜轧机传动简图
1—电动机；2—带式减速传动；3—圆柱齿轮减速装置；4—分速齿轮；5—花键轴；6—万向联接轴；7—锥齿轮；8—轧辊

3）钳式斜轧机。钳式斜轧机见图 5.3-42 所示。

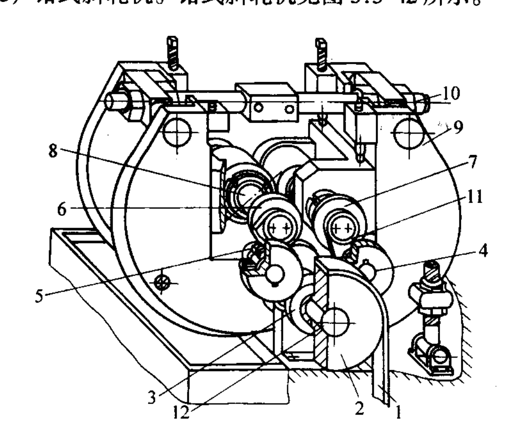


图 5.3-42　钳式斜轧轧机
1—传动带；2—带轮；3、4、5、6、7—传动齿轮；8—轧辊轴；9—C 形机架；10—机架拉杆螺栓；11—连板；12—通轴

这种型式的斜轧机与机床式斜轧机类似，电动机、传动机构与工作机构置于一体，具有结构紧凑占地面积小等优点。与机床式斜轧机相比，传动齿轮量少，而且没有用于转向的圆锥齿轮；通过调整机架拉杆螺栓 10 使 C 形机架 9 绕通轴 12 摆动，达到轧辊径向调整目的。故具有零部件少、制造容易、设备重量轻、占地面积少等优点。

钳式斜轧机的缺点是：传动齿轮是开式或者半闭式的，工作时噪声较大；进料或者出料受到传动齿轮影响；更换下导板比较麻烦等。

这种轧机主要用于冷轧小钢珠一类的产品。

6.2　穿孔式斜轧机

（1）工作机座

斜轧是靠轧辊实现成形的。为了控制轧件位置，还设有导板这个辅助工具。工作机座的作用是：承担轧辊与导板的固定与调整，以及承担它们工作时产生的载荷。

对工作机座的基本要求是：固定要牢靠；调整要准确、方便；要有足够的强度与刚度；能快速拆卸更换零部件等。

ϕ75 mm 球磨钢球轧机的工作机座如图 5.3-43 所示。

它由七个主要部分组成：即轧辊辊系 1、轧辊轴向调整机构 2、轧辊角度调整机构 3、轧辊径向调整机构 4，上下导板装置 5 与 6、机架部件 7。

该设计特点是：①更换轧辊方便。只要打开上盖向上吊走轧辊即可。②采用电动带钢压下。这对于轧制球磨钢球，当坯料尺寸变化较大，或者加热、轧制温度范围波动较大时有利于保证钢球质量。③轴向调整与角度调整都采用两端对称配置，有利于消除间隙，保证位置稳定。

1）轧辊辊系。对于穿孔式斜轧机，通常将轧辊、轧辊轴、轴承和轴承座等组成一个独立的部件，称为轧辊辊系（也称轧辊箱）。这样的轧辊辊系对于一台斜轧机来说有好几对，其目的是为了在轧辊磨损或者变更轧制品种时节省换辊时间。

图 5.3-44 ϕ30 mm 钢球及滚子斜轧机的轧辊辊系。为了换辊方便，把它设计成随时可以拆开的独立部件。

在设计轧辊辊系的零部件时，应该考虑下面几个问题。

① 轧辊的材料。由于斜轧轧辊辊形棱角突出，轧制时单位压力大、速度差大，所以，轧辊材料要求选用高温、高压工作条件下耐磨损的。我国常用的材料如下。

热轧：35CrMnSi、5CrMnMo、5CrNiMo、3Cr2W8V。

冷轧：9CrSi、Cr12MoV、W18Cr4V。

热精轧：W6Mo5Cr4V2Al、5W2Cr4V2。

为了避免轧辊与轧件由于相对滑动造成轧辊表面粘料，除用液体强力冷却和润滑外，还要求轧辊的表面有较高的硬度。对于斜轧要求 HRC > 52，最好是 60 ~ 68HRC。上述材料有的通过热处理可以达到，有的则达不到，例如 5CrMnMo、5CrNiMo、3Cr2W8V 直接热处理达不到 HRC > 52 的要求，为此常采用轧辊表面软氮化或表面渗碳处理，这样做对提高轧辊寿命，避免轧辊表面粘料有明显的效果。

② 轧辊的装卸。斜轧轧辊都做成空心的，然后套装在轧辊轴上，而不像一般轧钢机的轧辊将它们二者做成一体。这是因为斜轧的轧辊使用周期较短，更换比较频繁，对轧辊及轧辊轴材料性能要求差异很大的缘故。

轧辊与轧辊轴分成两件的好处：第一，当轧辊磨损或其他原因损坏时，轧辊轴仍能断续使用；第二，可以分别用不同材料与热处理方法做轧辊与轧辊轴，因为轧辊主要要求耐磨，而轧辊轴主要要求足够的强度与韧性。



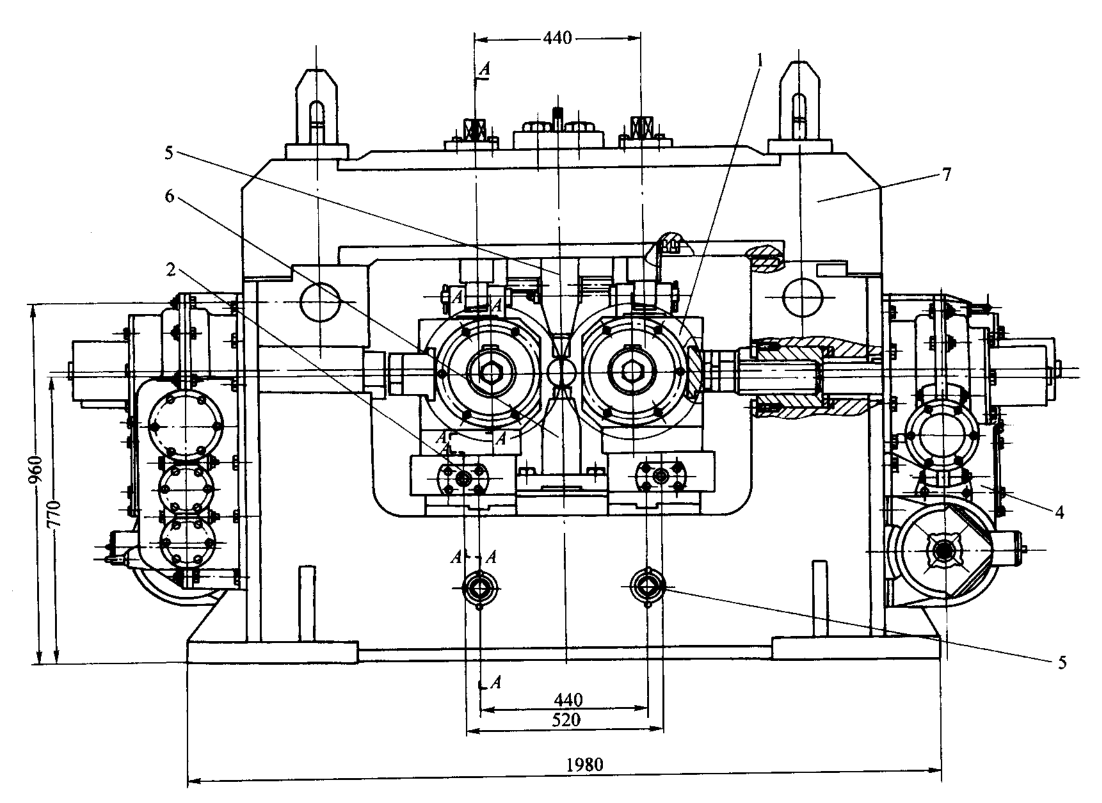


图 5.3-43 ϕ75 钢球轧机工作机座

1—轧辊辊系；2—轧辊轴向调整机构；3—轧辊角度调整机构；4—轧辊径向调整机构；5、6—导板装置；7—机架部件

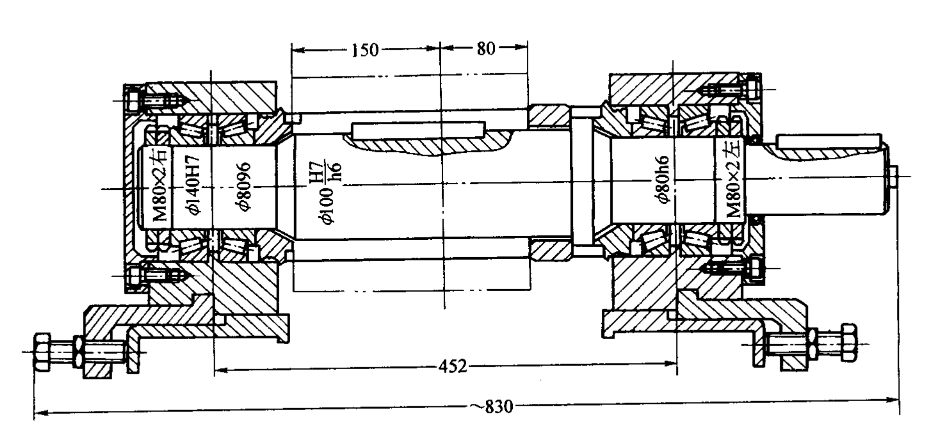


图 5.3-44 ϕ30 mm 钢球及滚子斜轧机的轧辊辊系

2）轴向调整机构。如果两个轧辊都是带型腔的，为了保证轴向对齐，必须设置轴向调整机构。即使一个轧辊为带型腔的，而另一轧辊为光面的，即所谓单孔型轧制，一般也要设立轴向调整机构。因为当两个轧辊出口端面没有对齐时，轧件轧到出口处容易被压偏，将已成型的轧件压出痕迹，造成废品。此外，对于精轧曲面轧辊，两轧辊的交叉点即喉径位置，在轴向也要求对齐。所以斜轧机要求设有轴向调整机构。

斜轧机常用的轴向调整机构有五种。

图 5.3-45 所示为双螺母轴向调整机构。它是靠固定在轧辊轴上两个螺母的松与紧来进行轴向调整的。这种结构相当简单，适用与小型斜轧机，例如冷轧自行车钢珠及滚针的机床式轧机。

图 5.3-46 所示为钩子式轴向调整机构。该结构比较简单，调整比较方便。缺点是当轴向调整受力大时，钩子 2 受一力偶作用，容易翘起，所以一般多用于小型斜轧机上，如 ϕ30 mm 钢球及滚子轧机就是采用这种结构。

图 5.3-47 所示为顶丝式轴向调整机构。该结构稍为复杂一些，但调整比较方便，能够解决翘起的问题。缺点是装卸轧辊箱较为麻烦。这种结构也多用于小型斜轧机上，如 ϕ20 mm 穿孔式斜轧机就是采用这种结构。

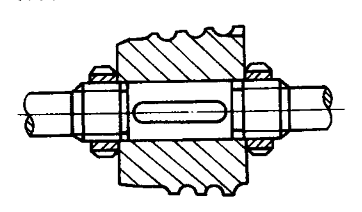


图 5.3-45 双螺母式轴向调整机构



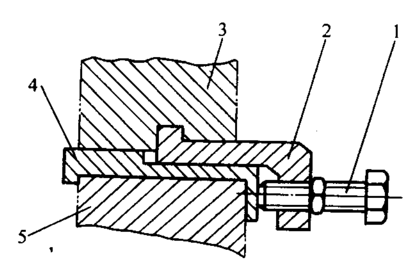


图 5.3-46　钩子式轴向调整机构

1—调整螺钉；2—钩子；3—轴承盒；4—滑板；5—转鼓

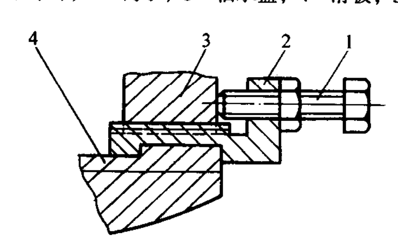


图 5.3-47　顶丝式轴向调整机构

1—调整螺钉；2—滑板；3—轴承盒；4—转鼓

图 5.3-48 所示为 C 形压板式轴向调整机构。该结构比较简单，调整比较方便。比较好地解决翘的问题，但是这种结构型式要求下面的转鼓托板 5 有足够的厚度。

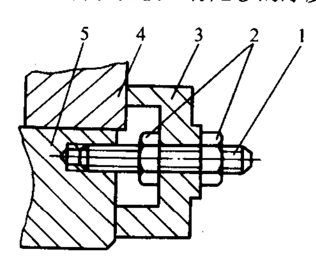


图 5.3-48　C 形压板式轴向调整机构

1—固定螺钉；2—调整螺母；3—C 形压板；4—轴承盒；5—转鼓

图 5.3-49 所示，为滑块式轴向调整机构。该结构多用于较大型的穿孔式斜轧机。它的结构虽然复杂一些，但调整方便、可靠。我国设计的 ϕ75 mm 球磨钢球轧机以及其他大型斜轧机都采用这种轴向调整机构。

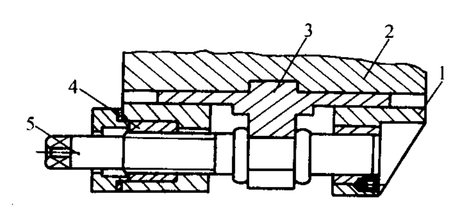


图 5.3-49　滑块式轴向调整机构

1—转鼓；2—轴承盒；3—十字滑块；4—固定螺母；5—调整螺杆

前三种类型的轴向调整机构，在轧辊辊系的两端都应该设置才能实现前后调整。C 形压板式轴向调整机构，只要轧辊一边有就能完成轧辊前后调整的要求，但免不了在滑块 3 的上部与轴承盒的配合处、滑块下部与螺杆 5 的两个凸环配合处存在间隙，因此轴向位置控制不准确，故还是两边设置这样的调整机构为好。

3）倾角调整机构。为了满足斜轧生产的工艺要求，斜轧机的轧辊大都设计成角度可以调整的。一般斜轧机的倾角调整范围在 8°以内。

轧辊倾角调整机构的型式是多种多样的。我们只就其中最具有代表性的加以介绍。

图 5.3-50 为角度调整机构。它采用两边都有调整机构的装置，通过一边退一边进进行调整。这种设计结构简单，使用方便可靠，而且易于拆换轧辊，因而在穿孔式斜轧机上得到广泛的应用。

4）径向调整机构。为了控制产品的径向尺寸，斜轧必须设置径向调整机构。因为径向调整比较常用，故要求它调整起来方便可靠。

此外，对径向调整机构还有以下要求。

① 为了保证轧辊平行移动，两边的径向压下机构应当同步。

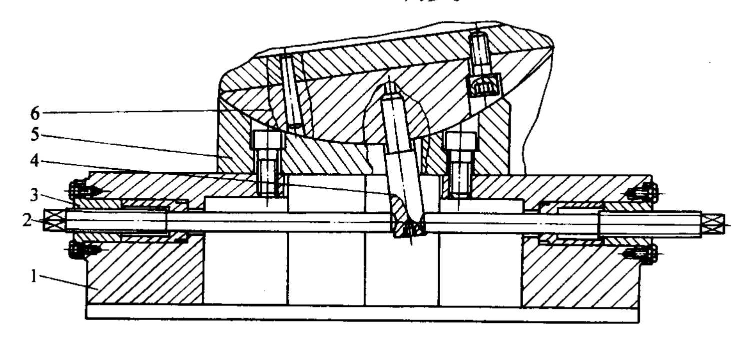


图 5.3-50　ϕ30 mm 钢球及滚子角度调整机构

1—工作机架；2—调整机架；3—固定螺母；4—摇杆；5—转鼓座；6—转鼓

② 为了能调喇叭口（孔型入口与出口间距离不等称喇叭口），轧辊辊系的任意一边可以单独调整，这种调整虽用得不多，但不能没有。

③ 除往里压有机构外，返回也应有机构（一般把返回机构称作平衡机构）。

径向调整机构可以分为两类，一类为手动，另一类为电动。手动的多用在小型的轧机上，电动的多用在大型或者需要经常调整的轧机上。

图 5.3-51 为斜轧机的手动径向调整机构。调整时人工转动手轮 1，带动中间齿轮 2 转动，中间齿轮 2 同时带动两边装在丝杠 3 上的两个齿轮 4 转动，两根丝杠 3 同时转动实现同步径向压入。由于齿轮 4 边转动边跟着丝杠移动，为保证啮合，中间齿轮 2 做成宽齿轮。如果径向要退出，则反转手轮 1；两个丝杠退出，中间的弹簧 5 把轧辊辊系拉出。如果要调喇叭口，则移动一边的齿轮 4，使其脱离中间齿轮 2，这时再转动手轮 1，使一边压入或退出，实现喇叭口的调整。

对于大型斜轧机，手动调整费力，故多采用电动压下。此外，在球磨钢球轧机上，由于来料直径尺寸公差较大，为保证钢球的质量，径向要经常调整，而且要求在轧制过程之中调整，人们称这种径向调整为带钢压下。如图 5.3-52 所示。



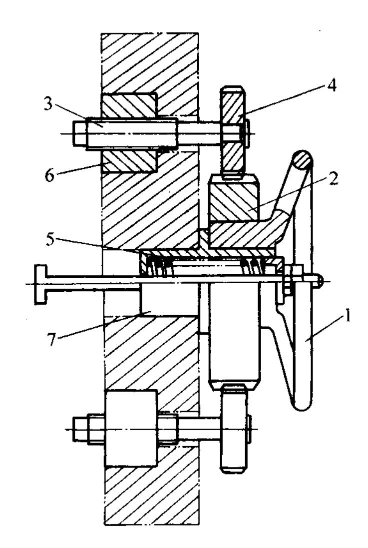


图 5.3-51 手动径向调整机构

1—手轮；2—中间齿轮；3—丝杠；4—齿轮；5—弹簧；6—螺母；7—固定套筒

5）导板装置。二辊斜轧机必须设有导板装置。轧制时，由于导板固定不动而轧件高速旋转前进，故在导板与轧件相互接触处有很大的切向与轴向滑动摩擦。热轧时，如果导板不进行冷却，或者冷却效果不好，连续生产不到半小时，导板的接触表面温度可达700℃以上。因此，在斜轧生产中，除对导板进行强力冷却外，还应选择高温下的耐磨材料。我国生产中常用的导板材料为：3Cr2W8V、高铬铸铁、K3高温合金以及在普碳钢上堆焊堆667耐磨合金等。

对导板的要求是：①既要拆卸方便又要固定牢靠；②既要有足够的刚度又要调整方便。这些要求相互矛盾，往往统一不起来。因此，目前使用的导板装置在生产中仍存在某些问题，需要进一步完善。

图5.3-53及图5.3-54为目前常用的穿孔机式斜轧机的上下导板装置。图5.3-53为上导板装置，图中导板10，通过螺钉9固定在滑板4上，滑板4通过螺母3、螺杆2与导板座1联系。调节螺杆2可以调节导板10的上下高度。导板调整完后通过螺栓7和压板8把导板10压紧。为了增强导板的刚性，防止轧制过程中发生振动，一般在机架上横梁的内侧，导板座的两侧都有带螺母的支腿6用螺杆5顶住导板座。

这种上导板机构比较可靠，但调整不太方便。为了调整导板高度，必须把整个导板座从轧机上卸下来，这样就增加了操作者的劳动强度与更换导板的时间。

图5.3-54为穿孔机式斜轧机下导板装置。图中螺钉5将下导板1固定在下导板升降滑板4上，通过螺栓6和压板2把下导板和导板座3固定在一起。当需要调节下导板的高度时，通过调节螺杆7带动带斜面的滑块8实现。

这种下导板装置比较可靠，但是调整不很方便。调整时需要移开轧辊辊系，才能用扳手松开固定导板的螺栓6。由于空间小，操作起来比较困难，此外，导板调好后还需重新对孔型。

为了克服上述缺点，还有一种下导板装置（如图5.3-55所示）。它与图5.3-54所示的结构区别在于导板座3与机座之间加上垫块2，下导板座的紧固螺栓也改成T形螺栓，因此，当更换或调整下导板时，只要把T形螺栓1取掉，把两端垫块2取出，下导板3便落到机座上。这样可在不改变轧辊间孔型尺寸的情况下，将导板连同导板座一起取出进行调整或更换。

（2）减速机与齿轮机座

我们把主要完成降低转速的齿轮装置称为减速机，把主要完成将一个转动变为两个同方向转动的装置称为齿轮座。

减速机与齿轮座分别做成两个独立的部件，即减速机与齿轮座部件，图5.3-40所示的就是这种。另一种是把减速机与齿轮座合在一起，共用一个箱体，如图5.3-41所示的，我们称它为减速－齿轮座部件。

减速机与齿轮座分成两个部件的设置主要用于大中型斜轧机上，这样做的优点是使用可靠、维修方便；缺点是设备重量大，占地面积大，所以小型斜轧机做成减速－齿轮座这种复合型式。

在某些小型的轧机上，也有采用减速机与齿轮座分为两个部件的，其主要目的是为了选用标准的减速箱，简化设计。

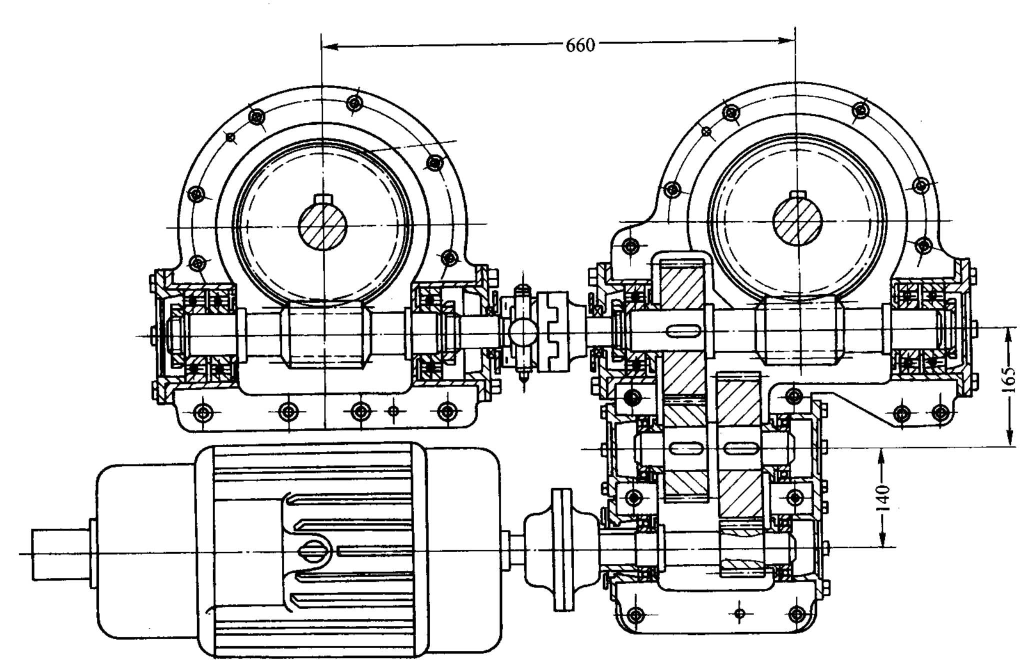


图 5.3-52 电动径向调整机构



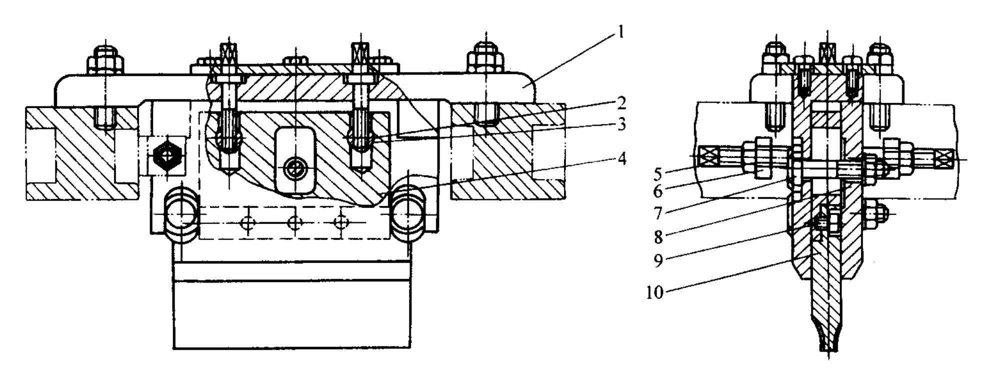


图 5.3-53 斜轧机的上导板装置

1—导板座；2—调节螺杆；3—圆螺母；4—滑板；5—螺杆；6—固定螺母支腿；7—螺栓；8—压板；9—螺钉；10—导板

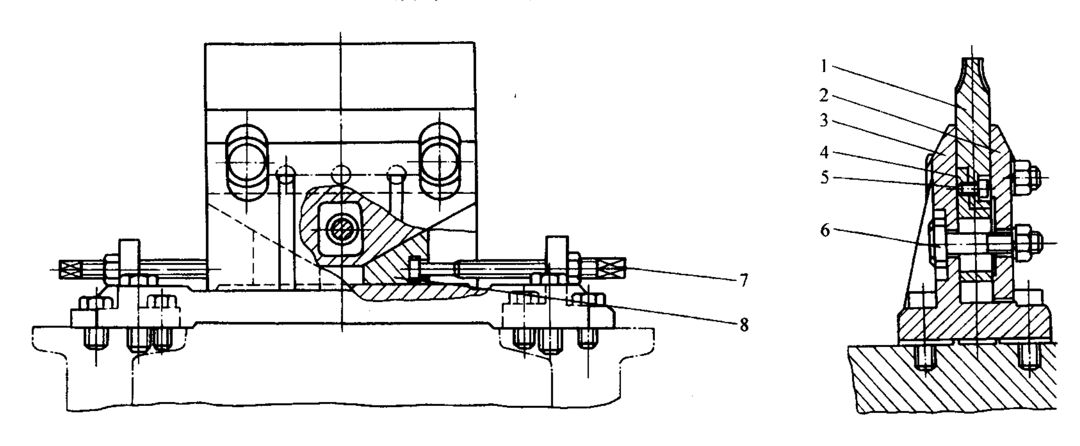


图 5.3-54 斜轧机的下导板装置

1—导板；2—压板；3—导板座；4—滑板；5—螺钉；6—螺栓；7—螺杆；8—带斜面大滑块

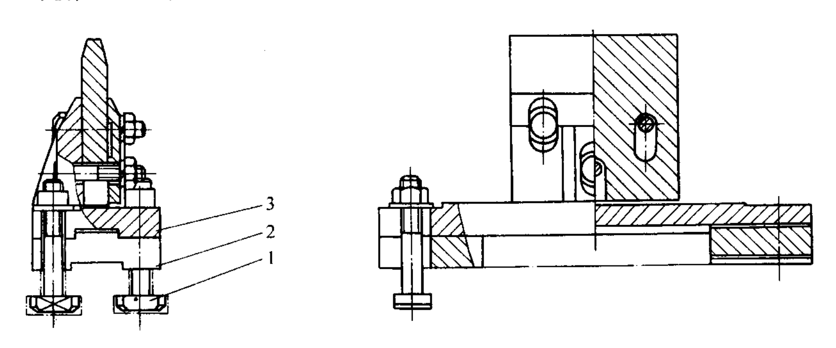


图 5.3-55 改进型斜轧机的下导板装置

1—T形螺栓；2—垫块；3—导板座

图 5.3-56 为 ϕ20 mm 钢球轧机的齿轮座。这种结构的优点是只有上下两个箱体，故制造、安装比较方便；三个齿轮一样大（速比为 1），故三个齿轮面都可以浸在油池中润滑，润滑效果好。但是这种形式的齿轮座的缺点是：两个出轴之间的水平距离比两个轧辊之间的大得多。当两个倾斜角的轧辊与水平齿轮座出轴相接时，必须加长万向联接轴的长度，否则造成万向联接轴的倾角过大。所以这种型式的齿轮座用得不多。

图 5.3-57 为 ϕ75 mm 球磨钢球轧机的齿轮座。机座为三分箱体，这种上下出轴的方式的齿轮座可以有效地缩短万向联接轴的设计长度。此外还有一个优点是推料气缸可以装在齿轮座 A 的位置，这样做既可节省推料气缸的位置又可省掉固定气缸的只架。所以斜轧机的齿轮座大多设计成这种三分箱式的。

图 5.3-58 为 ϕ30 mm 钢球及滚子机的减速－齿轮座复合型式装置。

上述三种斜轧机齿轮座的主要技术参数列于表 5.3-6 中。

（3）万向联接轴

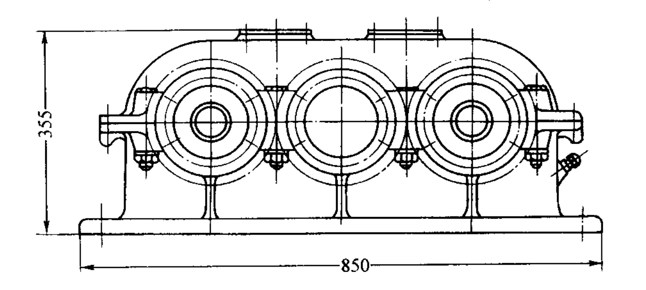
万向联接轴的作用是将齿轮座的两个出轴的动力与运动传递给机座中的两个轧辊。因为齿轮座的出轴与轧辊轴不在一条直线上，所以要用万向联接轴。

斜轧机用得最多的是滑块式万向联接轴，其典型结构如图 5.3-59 所示。

滑块式万向联接轴的主要优点是传递力矩大、外形尺寸小，因而得到广泛的运用。但缺点是在强烈的滑动摩擦下，滑块容易磨损，而磨损造成的间隙除带来的噪声外，还影响轧辊的相位准确。

由于滑块式万向联接轴存在容易磨损与噪声大等缺点，斜轧机上还采用带滚动轴承的万向联接轴，其典型结构如图 5.3-60 所示。





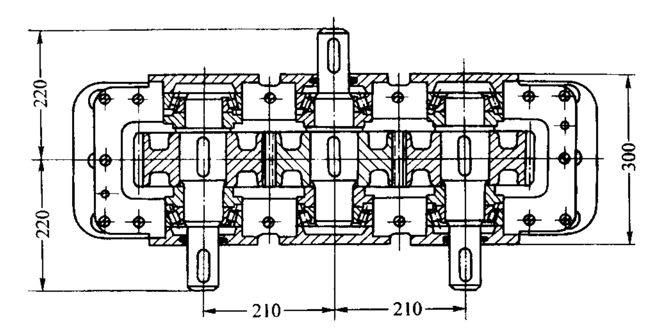
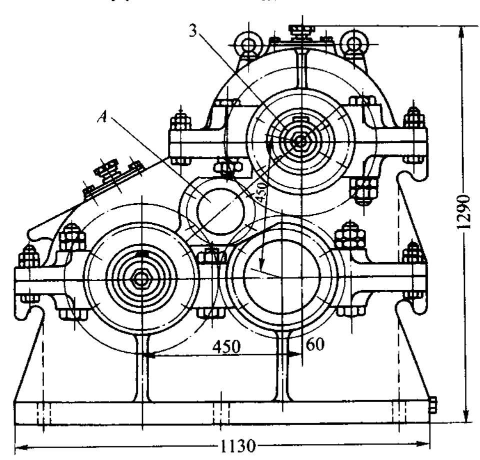


图 5.3-56　两分箱式齿轮座



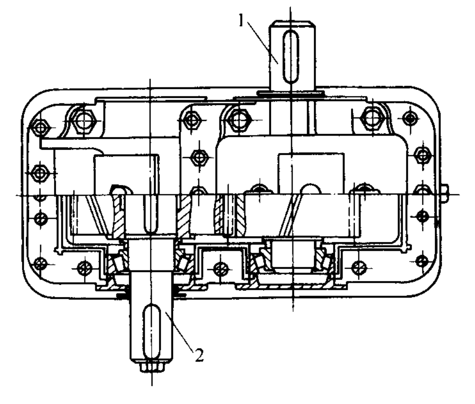
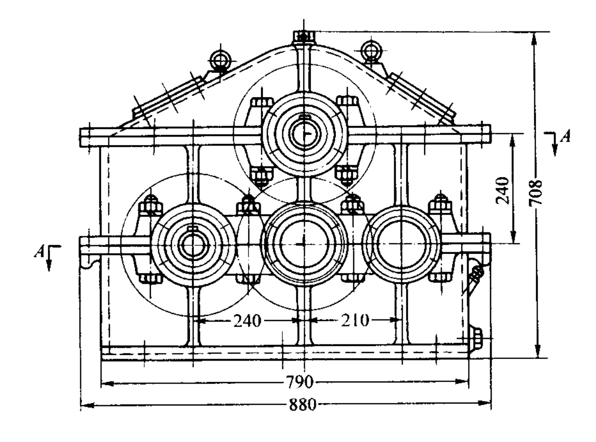


图 5.3-57　ϕ75 mm 球磨钢球轧机的三分箱式齿轮座
1—主动轴；2、3—从动轴



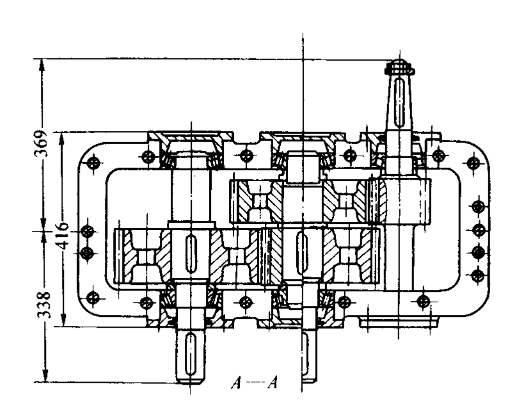


图 5.3-58　ϕ30 mm 钢球及滚子斜轧机的减速－齿轮座复合型装置

表 5.3-6　三种齿轮座的主要技术参数

参数	ϕ20 mm 轧球机	ϕ30 mm 轧球机	ϕ75 mm 轧球机
中心距/mm	210	240	450
法面模数 m_n/mm	5	8	10
小齿轮齿数 z_1	42	20	40
大齿轮齿数 z_2	42	39	49
速比 i	1	1.95	1.225
螺旋角 β	0	10°28′31″	8°32′57″

与滑块式万向联接轴相比，带滚动轴承的万向联接轴的优点是由于用滚动轴承代替了月牙形滑块，磨损件的使用寿命增加，噪声减小，冲击与振动减小以及传动效率提高等；此外，由于滚动轴承的间隙小，又不易磨损，故轧辊相位容易控制，有利于轧制。

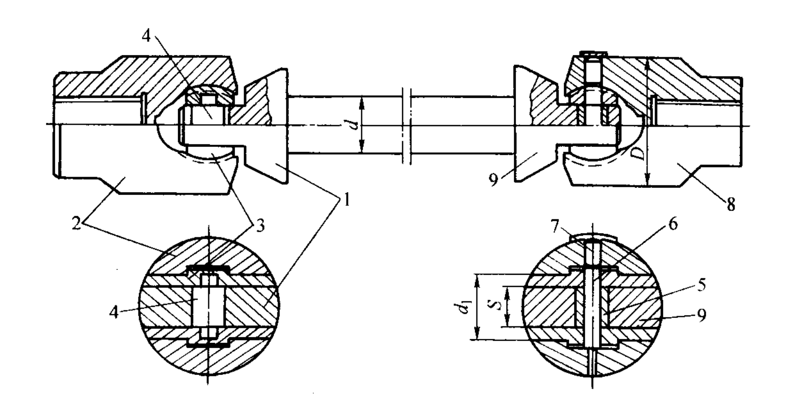


图 5.3-59　滑块式万向联接轴

1—带缺口扁头；2—轧辊端叉头；3—月牙形滑块；4—小方形轴；5—铜衬套；6—销轴；7—堵头销；8—齿轮座端叉头；9—带圆孔扁头

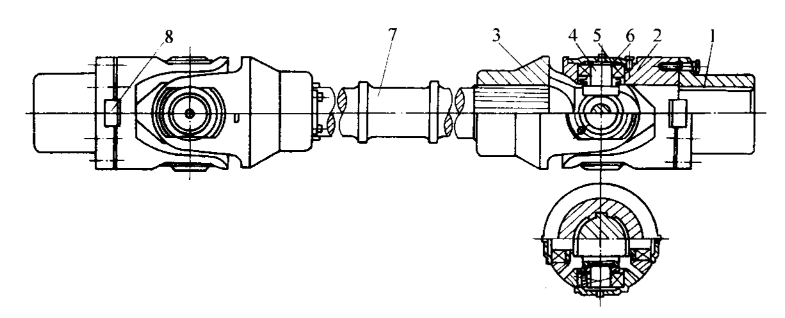


图 5.3-60　带滚动轴承的万向联接轴

1—半联轴节；2—叉形接头；3—带花键的叉形接头；4—十字轴；5—球面滚子轴承；6—端盖；7—连接轴；8—端面键

编写：胡正寰（北京科技大学）
刘晋平（北京科技大学）



第4章 环件轧制

环件轧制是借助轧环机使环件连续咬入驱动辊与芯辊构成的轧制孔型，产生壁厚减小、直径扩大、截面轮廓成形的塑性加工技术。环件轧制是连续局部塑性成形工艺，与整体模锻成形工艺相比，它具有大幅度降低设备吨位和投资、振动冲击小、节能节材、生产成本低等显著技术经济优点，是轴承环、齿轮环、法兰环、火车车轮及轮箍、燃汽轮机环等各类无缝环件的先进制造技术，在机械、汽车、火车、船舶、石油化工、航空航天、原子能等许多工业领域中日益得到广泛的应用。在工业生产中，环件轧制又称为轧环、辗环、辗扩或扩孔，轧环机又称为辗环机、辗扩机或扩孔机。

(1) 环件轧制特点

环件轧制工艺通常是以锻锤—轧环机、平锻机—轧环机、锻锤—压力机—轧环机等设备配置组织生产，与传统的环件自由锻造工艺、环件模锻工艺、环件火焰切割工艺相比，环件轧制具有显著的技术经济优点。

1) 环件精度高、加工余量小、材料利用率高。冷轧成形的环件几何精度可以达到精车加工的精度。热轧成形的环件几何精度与模锻环件相当，制坯冲孔连皮小，而且无飞边材料消耗。与环件自由锻工艺和火焰切割工艺相比，轧制成形环件精度大为提高、加工余量大为减少，而且环件表面不存在自由锻与马架扩孔的多棱形和火焰切割的粗糙层。

2) 环件内部质量好。轧制成形的环件，内部组织致密、晶粒细小、纤维沿圆周方向排列，其机械强度、耐磨性和疲劳寿命明显高于其他锻造和机械加工生产的环件。

3) 设备吨位小、投资少、加工范围大。环件轧制变形是通过局部变形的积累而实现环件成形的。与整体模锻变形相比，环件轧制变形力大幅度减小，因而轧制设备吨位大幅度降低，设备投资大幅度减少。EQ140 汽车后桥从动锥齿轮锻件为 ϕ382 mm 的环件，其整体模锻成形需要 8 000 t 热模锻压力机，而采用环件轧制工艺仅需 750 kg 空气锤制坯和 D51-400 扩孔机轧制成形。D51-400 扩孔机吨位为 18 t，其吨位和设备投资远远小于模锻设备。一般的环件轧制设备加工的环件尺寸范围较大，所加工的环件最大直径与最小直径相差 3 ~ 10 倍，最大重量与最小重量相差数十倍，这是其他的加工设备难以达到的。

4) 生产率高。环件轧制设备的轧制速度通常为 1 ~ 2 m/s，轧制周期一般为 10 s 左右，最小周期已达 3.6 s，最大生产率已达 1 000 件/h，大大高于环件的自由锻造和火焰切割，也高于模锻生产率。

5) 生产成本低。环件轧制具有材料利用率高、机加工工时少、生产能耗低、轧制孔型寿命长等综合优点，因而生产成本较低。德国制造 $\phi3\ 500 \times 110 \times 90$ 的碳钢环件，自由锻比轧制生产成本高 77%，火焰切割比轧制生产成本高 16%。前苏联统计，环件轧制与自由锻相比，材料消耗降低 40% ~ 50%，生产成本降低 75%。用环件轧制生产 EQ140 汽车后桥从动锥齿轮锻件，相对于模锻成形单件材料消耗降低 5 kg，降低生产成本 20%。

(2) 环件轧制分类

1) 径向轧制。环件径向轧制原理如图 5.4-1 所示。驱动辊为主动辊，同时作旋转轧制运动和直线进给运动；芯辊为被动辊，作从动旋转轧制运动；导向辊和信号辊都为可自由转动的从动辊。在驱动辊作用下，环件通过驱动辊与芯辊构成的轧制孔型产生连续局部塑性变形，使环件壁厚减小、直径扩大、截面轮廓成形。当环件经过多转轧制变形且直径扩大到预定尺寸时，环件外圆表面与信号辊接触，驱动辊停止直线进给运动并返回，环件轧制过程结束。轧制过程中，导向辊的导向运动保证了环件的平稳转动。环件径向轧制中，驱动辊旋转轧制运动由电动机提供动力，直线进给运动由液压或气动装置提供动力，其他轧辊运动没有外部动力，而是在环件摩擦力作用下随环件作从动运动。环件径向轧制设备结构简单，广泛地用于中小型环件轧制生产，但轧制的环件端面质量难以保证，环件端面常有凹坑缺陷。

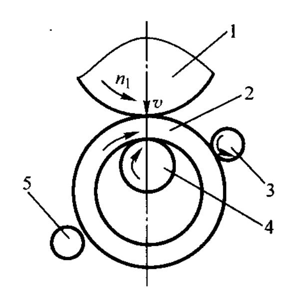


图 5.4-1 环件径向轧制

1—驱动辊；2—环件；3—导向辊；4—芯辊；5—信号辊

2) 径—轴向轧制。为了改善轧制环件的端面质量，轧制成形复杂截面轮廓的环件，在径向环件轧制设备的基础上，增加一对轴向端面轧辊，对环件的径向和轴向同时进行轧制，这样使得径向轧制产生的环件端面凹陷再经过轴向端面轧制而得以修复平整。环件径—轴向轧制如图 5.4-2 所示，驱动辊作旋转轧制运动，芯辊作径向直线进给运动，端面轧辊作旋转端面轧制运动和轴向进给运动。在径—轴向轧制中，环件产生径向壁厚减小、轴向高度减小、内外直径扩大、截面轮廓成形的连续局部塑性变形，当环件经反复多转轧制使直径达到预定值时，芯辊的径向进给运动和端面辊的轴向进给运动停止，环件径—轴向轧制变形结束。环件径—轴向轧制设备结构复杂，主要用于大型环件轧制生产。

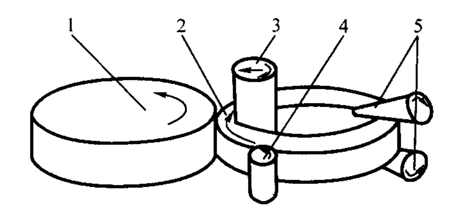


图 5.4-2 环件径—轴向轧制原理

1—驱动辊；2—环件；3—芯辊；4—导向辊；5—端面轧辊

(3) 环件轧制应用

环件轧制适于生产各种形状尺寸、各种材料的环形零件或毛坯。目前轧制环件的直径为 ϕ20 ~ 10 000 mm，高度为 10 ~ 4 000 mm，最小壁厚为 2 ~ 48 mm，环件的质量为 0.1 ~ 82 000 kg。环件的材料通常为碳钢、合金钢、铝合金、铜合金、钛合金、钴合金、镍基合金等。常见的轧制环件产品有轴承环、齿轮环、火车车轮及轮箍、燃气轮机环、集电环等，最大的轧制环件是直径 ϕ10 000 mm、高度 4 000 mm 核反应堆容器环件。典型的轧制环件产品形状如图 5.4-3 所示。

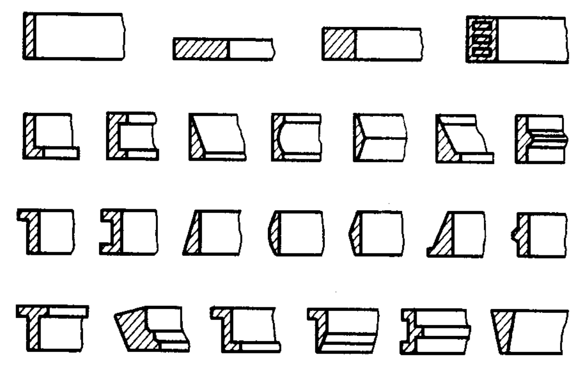


图 5.4-3 环件轧制典型产品形状

1 环件轧制成形原理

环件轧制是轧制技术与机械零件制造技术的交叉和结合，轧制过程中环件运动、旋转轧制运动、直线进给运动和导向运动相互影响。环件轧制变形有如下特点：①构成轧制孔型的驱动辊与芯辊直径相差悬殊。②驱动辊作主动旋转轧制运动，芯辊作从动旋转轧制运动，且它们的转速不同。③旋转轧制运动与直线进给运动相互独立。④径向轧制运动与端面轴向轧制运动相互制约，并都受到导向运动的约束与干涉。⑤轧制中环形毛坯反复多次通过高度逐渐减小的轧制孔型。⑥环件变形区几何边界是复杂的和不稳定的，变形的热、力条件也是动态变化的。由于这些特点，环件轧制表现出了非对称轧制、异步轧制、多道次轧制、型材轧制等性质，表现出了高度的几何非线性、物理非线性、边界条件非线性和时变性质。环件轧制不仅受到静力学、运动学和动力学因素的影响，而且还受到这些因素的耦合影响，因而环件轧制变形具有高度的复杂性。环件轧制中经常发生异常现象：①环件在孔型中不转动。②环件在孔型中转动但直径不扩大。③环件突然压扁。④环件直径扩大速度剧烈变化。⑤已经成形的环件截面轮廓在轧制中又逐渐消失。⑥环件及轧辊强烈自激振动等。任一异常现象的出现将会破坏环件轧制的稳定性，导致环件轧制过程无法正常进行，并产生轧制废次品。为了实现稳定的环件轧制生产，需要从环件轧制原理上阐明这些现象及其变化规律，需要从工艺设计和过程控制上主动消除和避免这些现象。

1.1 环件轧制几何学

(1) 环件轮廓曲线

在平稳环件轧制中，环件轧制一转其壁厚减小量为 Δh。其中，环件外形壁厚减小量为 Δh_1，内孔壁厚减小量为 Δh_2。环件轧制中的内、外轮廓曲线的几何性质，必须符合环件内、外壁厚变化规律。据此，可得环件轧制中的轮廓形状如图 5.4-4 所示。由环件轧制壁厚变化规律和图示几何关系可知，环件内、外轮廓曲线（接触弧长以外的部分）分别为右旋和左旋阿基米德螺线，其曲线方程为

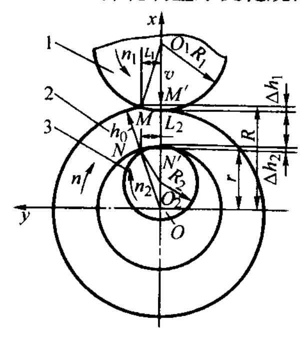


图 5.4-4 环件轧制中的轮廓形状

1—驱动辊；2—环件；3—芯辊

$$\begin{cases}\rho_1 = R\left(1-\dfrac{\Delta h_1}{R}\dfrac{\theta}{2\pi}\right),0\leqslant\theta\leqslant 2\pi\\ \rho_2 = r\left(1+\dfrac{\Delta h_2}{r}\dfrac{\theta}{2\pi}\right),0\leqslant\theta\leqslant 2\pi\end{cases} \tag{5.4-1}$$

式中，ρ_1，ρ_2 分别为环件外轮廓曲线和内轮廓曲线的极半径；R，r 分别为环件外轮廓曲线和内轮廓曲线的起始极半径；θ 为极角。

(2) 环件变形几何参数

1) 起始极半径

$$\begin{cases}R = \dfrac{R_0^2 - r_0^2 + h_0^2}{2h_0}\\ r = \dfrac{R_0^2 - r_0^2 - h_0^2}{2h_0}\end{cases} \tag{5.4-2}$$

式中，R_0，r_0，h_0 分别为环件轧制前的初始外半径、内半径和壁厚。

2) 接触弧长与每转进给量

$$\begin{cases}L = \sqrt{\dfrac{2\Delta h}{\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}+\dfrac{1}{R}-\dfrac{1}{r}}}\\ \Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2\end{cases} \tag{5.4-3}$$

式中，L，Δh 分别为接触弧长和每转进给量；R_1，R_2 分别为驱动辊和芯辊的工作面半径。

3) 进给量分配

$$\begin{cases}\Delta h_1 = \dfrac{L^2}{2}\left(\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R}\right)\\ \Delta h_2 = \dfrac{L^2}{2}\left(\dfrac{1}{R_2}-\dfrac{1}{r}\right)\end{cases} \tag{5.4-4}$$

1.2 环件轧制静力学

环件轧制过程可分为环件咬入孔型建立轧制过程阶段、稳定轧制阶段、轧制结束阶段。在环件正常轧制过程中，进给速度和旋转轧制速度都不大，而且速度变化也较小，近似处于静力平衡状态，因而可根据静力学理论对环件轧制进行分析。

(1) 环件咬入过程

1) 咬入力学模型和咬入条件。环件轧制类似于轧钢中的穿孔轧制，环件连续咬入孔型是环件转动并实现稳定轧制的必要条件。忽略导向辊对环件的作用力，提出环件咬入孔型的力学模型如图 5.4-5 所示。图中，P_1 和 T_1 分别为驱动辊对环件的正压力和摩擦力，P_2 为芯辊对环件的正压力（芯辊为空转辊，它随环件一起转动，不能承受摩擦力矩，所以芯辊对环件摩擦力的合力为零，而仅有正压力）。记 α_1、α_2 分别为驱动辊和芯辊与环件的接触角，R_1、R_2 分别为驱动辊和芯辊的工作面半径，h_0、h 分别为环件在孔型入口处和出口处的壁厚，$\Delta h = h_0 - h$ 为环件轧制中每转壁厚减小量，n_1 为驱动辊转速，L 为接触弧长在进给方向的投影长度。近似认为轧辊对环件作用力的合力作用点位于接触弧的中点。要使环件咬入孔型，则环件所受的拽入力必须大于或等于它所受的推出力，而进给方向环件的受力是平衡的。据此，由图 5.4-5 的环件受力平衡条件求解得环件咬入条件为

$$\beta \geqslant \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \tag{5.4-5}$$

式中，β 为环件与轧辊之间的摩擦角，记 μ 为摩擦系数，则 $\mu = \tan\beta$。由式 (5.4-5) 可知，要使环件连续咬入孔型，则轧辊与环件之接触角的平均值不得超过摩擦角。



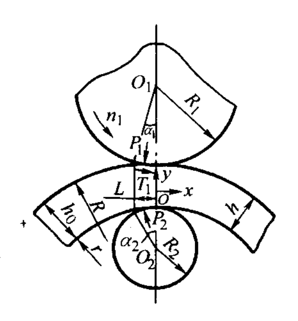


图 5.4-5 环件咬入孔型力学模型

2）咬入条件与进给量的关系。由图 5.4-5 几何关系看出，由于接触角 α_1 和 α_2 都很小，所以接触弧长在进给方向的投影长度 L 与接触弧长近似相等（以下都认为接触弧长投影与接触弧长相等），于是有 $\alpha_1 \approx \frac{L}{R_1}$，$\alpha_2 \approx \frac{L}{R_2}$。将该式和式（5.4-3）代入式（5.4-5）整理得环件咬入孔型条件与进给量关系为

$$\Delta h \leqslant \Delta h_{\max} = \frac{2\beta^2 R_1}{(1+R_1/R_2)^2}\left(1+\frac{R_1}{R_2}+\frac{R_1}{R}-\frac{R_1}{r}\right) \quad (5.4\text{-}6)$$

式中，$\Delta h_{\max}$ 为环件咬入孔型所允许的最大每转进给量或环件最大每转壁厚减小量。该式表明，要使环件连续咬入孔型，则每转进给量不得超过环件咬入所允许的最大每转进给量。

3）咬入条件影响因素。由式（5.4-6）可知，环件咬入孔型的最大每转进给量与轧制摩擦、轧辊尺寸、环件尺寸等有关。轧制摩擦增大是有利于环件咬入孔型的。环件外半径增大而内半径不变，不利于环件咬入；环件内半径增大而外半径不变，有利于环件咬入。环件轧制过程中，咬入孔型所允许的最大每转进给量随着轧制的进行而缓慢增大。也就是说，在保持其他因素不变的条件下，只要环件一经咬入孔型而建立起轧制过程，则环件轧制可以始终满足咬入条件而使环件连续咬入孔型。若要改善环件咬入孔型条件，可以考虑增大摩擦，改变轧辊直径，减小轧制用毛坯壁厚，或者减小每转进给量。其中以增大轧辊与环件之间的摩擦和减小每转进给量效果最好，也容易实现。所以实际环件轧制生产中，通常都通过增大摩擦或者减小每转进给量来改善咬入条件。增大摩擦的常用办法是，将轧辊刻印，涂覆摩擦涂料等。

4）环件轧制中不转动的本质。环件轧制中不转动现象，是指环件与芯辊一起处于静止状态，驱动辊相对于环件作滑动转动，环件无法产生轧制变形，轧制过程中断。其本质原因是环件轧制咬入条件得不到满足，亦即环件轧制实际每转进给量超过了咬入条件所允许的最大每转进给量，环件因不能咬入孔型而不转动。要消除环件轧制中的不转动现象，也就是使环件连续咬入孔型，必须满足环件轧制咬入条件。因此可以说，咬入条件是环件轧制的必要条件。环件轧制过程中，若出现环件不转动亦即环件不能咬入孔型现象，则应通过改善咬入条件来予以消除。增大轧制摩擦，减小轧制用环件毛坯增厚、减小每转进给量，改变轧辊直径等，都可以有效地改善咬入条件，有利于环件咬入孔型。

（2）环件锻透状况

1）环件锻透力学模型和条件。环件连续咬入孔型只是使环件产生轧制运动，并不一定能保证环件产生轧制变形即环件壁厚减小、直径扩大的塑性变形，所以环件咬入孔型仅是环件轧制变形的必要条件。要使环件既咬入孔型又产生轧制变形，除了满足咬入条件外还应使环件锻透，即塑性区穿透整个环件的壁厚，也就是满足环件锻透条件。环件锻透是指塑性区穿透环件壁厚，环件产生壁厚减小、直径扩大的塑性变形，所以环件锻透条件是环件轧制变形的充分条件。环件锻透相当于有限高度块料拔长，塑性区穿透环件壁厚的力学模型如图 5.4-6 所示。图中 L 为环件接触弧长，h_a 为环件轧制变形区的平均壁厚，且 $h_a = \frac{h_0+h}{2}$。根据滑移线理论对图 5.4-6 塑性变形进行分析得塑性区穿透环件壁厚即环件锻透条件为

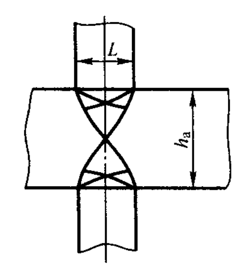


图 5.4-6 环件轧制锻透力学模型

$$\frac{L}{h_a} \geqslant \frac{1}{8.74} \quad (5.4\text{-}7)$$

2）锻透条件与进给量的关系。由图 5.4-4 几何关系，$h_0 = h + \Delta h$，所以 $h_a = \frac{h_0+h}{2} = h + \frac{\Delta h}{2} \approx h = R - r$。将 $h = R - r$ 及接触弧长 L 表达式代入式（5.4-7）整理得环件锻透条件与进给量关系亦即进给量表示的锻透条件为

$$\Delta h \geqslant \Delta h_{\min} = 6.55 \times 10^{-3} R_1 \left(\frac{R}{R_1}-\frac{r}{R_1}\right)^2\left(1+\frac{R_1}{R_2}+\frac{R_1}{R}-\frac{R_1}{r}\right) \quad (5.4\text{-}8)$$

式中，$\Delta h_{\min}$ 为环件锻透所要求的最小每转进给量亦即环件最小的每转壁厚减小量。该式表明，要使环件锻透产生轧制变形，则环件轧制中的每转进给量不得小于锻透所要求的最小每转进给量。

3）锻透条件影响因素。由式（5.4-8）可知，最小每转进给量与轧辊尺寸和环件尺寸有关。驱动辊和芯辊半径增大有利于环件锻透，而驱动辊和芯辊半径减小则不利于环件锻透。环件内半径 r 不变而外半径 R 增大，不利于环件锻透；环件外半径 R 不变而内半径 r 增大，有利于环件锻透。若在环件轧制开始时塑性区穿透环件壁厚，则在其他条件不变时整个轧制过程中塑性区都会穿透环件壁厚，即环件锻透条件都会得到满足。要改善环件轧制的锻透条件，可以考虑增大每转进给量、增大轧辊半径、减小环件壁厚等措施。在轧环机设备能力许可条件下增大每转进给量，或在制坯加工许可情况下减小轧制用环件毛坯的壁厚，是改善环件轧制锻透条件的有效和可行的方法。

4）环件轧制中转动但直径不扩大的本质。环件轧制中转动但直径不扩大的现象，是指环件虽然能连续咬入孔型产生轧制转动，但并没有产生整体直径扩大的塑性变形，即使长时间轧制也不能获得所要求的轧制环件。其中，环件转动表明环件轧制满足咬入条件，而环件直径不扩大是因为塑性变形区没有穿透环件径向壁厚，也就是环件外圆和内孔的表层为塑性区而心部仍为刚性区，因而不产生周向伸长和直径扩大的塑性变形。所以环件轧制中转动但直径不扩大现象的物理本质是，咬入条件得到了满足但锻透条件没有得到满足。消除环件轧制中转动但直径不扩大的现象，应通过改善锻透条件来予以解决。增大每转进给量、增大轧辊半径、减小环件壁厚等，都可有效地改善锻透条件，有利于环件锻透并产生直径扩大的塑性变形。

（3）环件塑性失稳状况

环件轧制中的塑性失稳现象是指环件在导向辊的压力作用下压扁而成为废品。

1）导向辊压力。参见图 5.4-7，环件轧制中驱动辊对环

件的作用力的法向和切向力分别为 P_1 和 T_1，芯辊和导向辊都为空转辊，不能承受摩擦力矩，它们对环件的作用力仅有法向力，其大小分别为 P_2 和 P_3。为了便于计算，假设驱动辊和芯辊对环件作用力的作用点都位于各自与环件接触弧的中点，同时假设驱动辊与环件接触摩擦符合库仑摩擦定律即 $T_1=\mu P_1$，μ 为接触面摩擦系数。于是由环件受力平衡条件求解得导向辊压力为

$$P_3 = P_1 \frac{1+\dfrac{R_2}{R_1}}{\dfrac{2R_2\cos\theta}{L}+\sin\theta} \tag{5.4-9}$$

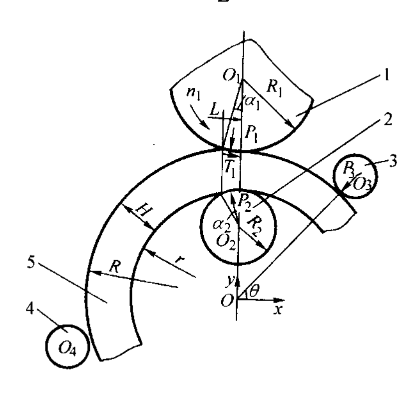


图 5.4-7　导向辊受力分析

1—驱动辊；2—芯辊；3—导向辊；4—定位辊；5—工件

2）环件塑性失稳力学模型和刚度条件。环件轧制塑性变形区位于辊缝中的狭小区域，而整体环件仍保持圆环形状。环件在导向辊压力作用下产生塑性失稳而压扁，相当于以辊缝处为固定支承的圆环曲梁在导向辊压力作用下产生塑性弯曲变形。于是提出环件在导向辊压力作用下产生塑性失稳力学模型如图 5.4-8 所示。图中 r_a 为环件内外半径的平均值，圆环曲梁的截面积等于轧制环件的截面积。由图 5.4-8 可知，环件所受最大弯矩位于固定支承处，亦即位于轧制变形区出口处，其值 $M=P_3r_a\cos\theta$。根据梁弯曲理论，圆环曲梁处于弹性状态而不产生塑性变形的条件亦即环件轧制中不产生塑性失稳的刚度条件为$\dfrac{M}{W_z}\leqslant[\sigma]$，这里 W_z 为圆环曲梁抗弯截面模量，对于轴向尺寸为 B，截面高度为 H 的矩形截面环件，其 $W_z=\dfrac{BH^2}{6}$；$[\sigma]$ 为圆环曲梁的许用应力，这里取其值为环件材料在轧制条件下的屈服强度 σ_s，即 $[\sigma]=\sigma_s$。将 W_z、$[\sigma]$ 和最大弯矩 M 代入环件塑性失稳刚度条件整理得

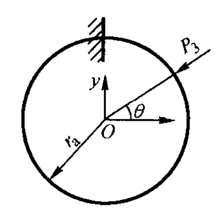


图 5.4-8　环件塑性失稳力学模型

$$H\geqslant H_{\min}=\sqrt{\frac{6P_1\left(1+\dfrac{R_2}{R_1}\right)r_a}{\left(\dfrac{2R_2}{L}+\tan\theta\right)B\sigma_s}} \tag{5.4-10}$$

上式为用环件壁厚表示的刚度条件。要使环件在轧制中不产生塑性失稳，则环件的壁厚不得小于塑性稳定所要求的最小壁厚 $H_{\min}$。为了计算方便，对上式进行整理和简化得环件在轧制中不产生塑性失稳的刚度条件为

$$H\geqslant H_{\min}=0.183\left(1+\frac{R_1}{R_2}\right)\frac{r_{a0}H_0}{R_1} \tag{5.4-11}$$

3）刚度条件影响因素。由式（5.4-11）可知，环件刚度条件所要求的最小环件壁厚与轧辊尺寸和环件原始尺寸有关。轧辊工作半径增大，使环件最小壁厚减小，有利于环件刚度条件。反之，轧辊尺寸减小不利于环件刚度条件。环件原始平均半径和原始壁厚减小是有利于环件刚度条件的。实际生产中，所要轧制的环件尺寸是给定的，因而环件的原始尺寸也随之确定。在已知轧辊尺寸时，可应用式（5.4-11）来校核环件的刚度。或在未知轧辊尺寸时，可应用环件刚度条件来设计轧辊。

4）环件突然压扁现象的本质。环件轧制中突然压扁的现象，是指环件在平稳轧制过程中突然被导向辊压扁而成为废品。这种现象的本质原因是环件的刚度条件得不到满足，因而在导向辊压力作用下产生塑性弯曲失稳。根据环件轧制中的刚度条件，增大轧制环件的壁厚、减小轧制环件的直径、采用较小每转进给量的轧制规程等，可以有效地消除环件轧制中的突然压扁现象。

1.3　环件轧制运动学

环件轧制过程中，驱动辊作旋转轧制运动，压力辊（在立式轧环机中，压力辊为驱动辊；在卧式轧环机中，压力辊为芯辊）作直线进给运动，导向辊（在卧式轧环机中，导向辊又称为抱辊）作导向运动。对于径—轴向轧环机，还有端面锥辊的轧制运动和进给运动。在轧辊的作用下，环件作壁厚减小和直径扩大运动。这些运动都作用于环件，并通过环件联系起来，直接影响到环件的轧制过程。

（1）环件轧制中的前滑和后滑

环件轧制中，变形区与轧辊接触边界上的速度与轧辊速度有关。其中，接触边界上任一点的速度法向分量等于轧辊在该点的速度法向分量。而接触边界上任一点的速度切向分量并不等于轧辊在该点的速度切向分量，所以变形区与轧辊接触边界上的金属质点相对于轧辊作滑动。若变形区与轧辊接触边界上的金属质点速度切向分量大于相应点的轧辊速度切向分量，则变形区金属相对于轧辊向前滑动。若变形区与轧辊接触边界上的金属质点速度切向分量小于相应点的轧辊速度切向分量，则变形区金属相对于轧辊向后滑动。变形区金属质点相对于轧辊向前滑动的区域称前滑区，变形区金属质点相对于轧辊向后滑动的区域称后滑区。环件轧制中，驱动辊与芯辊直径相差较大，且前者传递驱动力矩，后者仅作空转运动，所以环件变形区与驱动辊和芯辊接触边界上的金属质点滑动状况是不同的。

1）中性角。前滑区与后滑区的交界面称中性面，中性面所对应的轧辊圆心角称中性角。参见图 5.4-9，变形区与驱动辊接触边界的中性角为 γ_1，变形区与芯辊接触边界的

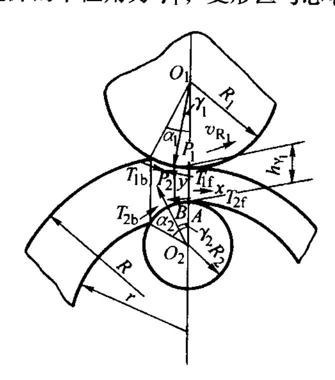


图 5.4-9　环件滑动受力状态



中性角为 γ_2。

① 芯辊中性角。芯辊是被动空转辊，可作自由转动，不能承受转动力矩，其中性角为

$$\gamma_2=\frac{1}{2}\alpha_2 \tag{5.4-12}$$

② 驱动辊中性角。对图5.4-9中的作用力进行分解和近似计算，并根据环件受力平衡分析得变形区与驱动辊接触边界的中性角为

$$\gamma_1=\frac{\alpha_1}{2}\left(1-\frac{1}{2\mu}\ (\alpha_1+\alpha_2)\right)=\frac{\alpha_1}{2}\left(1-\frac{\alpha_1}{2\mu}\ \left(1+\frac{R_1}{R_2}\right)\right) \tag{5.4-13}$$

由上式可知，变形区与驱动辊接触边界的中性角 $\gamma_1<\frac{\alpha_1}{2}$。这表明该边界的前滑区较小，而后滑区较大。

2）滑动系数。根据滑动定义，由金属体积流量不变条件（实质上是塑性变形体积不可压缩条件），环件轧制运动和几何关系求解得前滑系数 S_h 和后滑系数 S_H 分别

$$S_h=\frac{\gamma_1^2}{2}\left(\frac{R_1-h}{h}+\frac{R_1^2}{R_2h}\right) \tag{5.4-14}$$

$$S_H=1-\frac{1}{H\cos\alpha_1}\left(h+\frac{1}{2}\ (R_1-h)\ \gamma_1^2+\frac{1}{2}\frac{R_1^2}{R_2}\gamma_1^2\right) \tag{5.4-15}$$

由上两式得前滑系数与后滑系数的关系为

$$S_H=1-\frac{h}{H\cos\alpha_1}\ (1+S_h) \tag{5.4-16}$$

3）前滑与咬入条件。记 β 为环件轧制的摩擦角，则摩擦系数 μ 与摩擦角关系为 $\mu=\tan\beta\approx\beta$。若 $\beta=\frac{1}{2}\ (\alpha_1+\alpha_2)$，则由式（5.4-13）得驱动辊与环件变形区接触边界的中性角 $\gamma_1=0$。这种情况表示前滑区消失，亦即环件与驱动辊接触边界全部为后滑区，那么环件就不能咬入孔型。根据前述环件轧制咬入孔型条件，$\beta=\frac{1}{2}\ (\alpha_1+\alpha_2)$ 为环件咬入的极限情况，此时环件是不能咬入孔型的。由此可知，前滑与环件咬入条件是相关的，前滑区的消失等价于环件不能咬入孔型。这种前滑区消失的极限情况与环件的极限咬入条件的对应关系，揭示了环件轧制静力学规律与运动学规律的协调性。

（2）环件直径扩大运动

环件直径扩大运动用环件轧制中直径扩大速度和加速度等参数描述。环件轧制过程中直径扩大速度和加速度的变化规律，是环件轧制工艺设计和过程控制的基础。

1）环件直径扩大速度。记 D_0、d_0 和 H_0 分别为环件轧制前的初始外径、内径和壁厚，D、d 和 H 分别为环件轧制中的外径、内径和壁厚。若忽略环件轧制中的轴向宽展，则由塑性变形体积不变条件得

$$D=\frac{D_0+d_0}{2}\times\frac{H_0}{H}+H \tag{5.4-17}$$

$$d=D-2H \tag{5.4-18}$$

式中，环件壁厚与直径的关系为 $H_0=\frac{D_0-d_0}{2}$，$H=\frac{D-d}{2}$。式（5.4-17）和式（5.4-18）对时间求导数得环件直径扩大速度为

$$v_D=\left(\frac{D_0+d_0}{2}\times\frac{H_0}{H^2}-1\right)v \tag{5.4-19}$$

$$v_d=v_D+2v \tag{5.4-20}$$

式中，v 为环件壁厚减小速度，其值为 $v=-\frac{dH}{dt}$，它亦等于环件轧制直线进给运动速度；v_D、v_d 分别为环件轧制中的外径和内径扩大速度。

由上式可知，环件轧制中内径扩大速度 v_d 为外径扩大速度 v_D 与2倍的直线进给速度之和，亦即环件内径扩大速度始终大于环件外径扩大速度。

2）环件直径扩大加速度。环件直径扩大速度对时间求导数得环件直径扩大加速度为

$$a_D=\frac{dv_D}{dt}=\frac{(D_0+d_0)\ H_0}{H^3}v^2+\left(\frac{D_0+d_0}{2}\times\frac{H_0}{H^2}-1\right)\frac{dv}{dt} \tag{5.4-21}$$

$$a_d=\frac{dv_d}{dt}=a_D+2\frac{dv}{dt} \tag{5.4-22}$$

3）环件直径扩大运动影响因素和变化规律。由环件直径扩大速度和加速度表达式可知，环件轧制过程中直径扩大速度和加速度的影响因素有环件初始尺寸、环件轧制中的尺寸以及环件轧制直线进给速度。随着环件轧制的进行，环件的壁厚逐渐减小，环件直径扩大速度和加速度迅速增大。在定速进给时，环件直径扩大速度与直线进给速度成正比，与环件瞬时壁厚的平方成反比；环件直径扩大加速度与直线进给速度平方成正比，与环件瞬时壁厚的三次方成反比；整个环件轧制过程中，环件内径扩大速度始终大于外径扩大速度，环件内径扩大加速度也始终大于外径扩大加速度。对于定速进给环件轧制，环件最大直径扩大速度和最大直径扩大加速度都同时出现于环件轧制过程结束的瞬时；而环件最小直径扩大速度和最小直径扩大加速度都同时出现于环件轧制过程开始的瞬时。

（3）环件旋转运动

1）转动速度。环件轧制中不断地被咬入孔型作旋转运动，并同时产生壁厚减小和直径扩大的塑性变形。也就是说，环件在轧制过程中同时进行直径扩大运动和旋转运动。记 n_1、R_1 分别为驱动辊的转速和工作半径，n、R 分别为环件轧制中的转速和瞬时外圆半径，忽略环件轧制中的滑动，则驱动辊的线速度等于环件外圆的线速度。由此得环件轧制中旋转运动转速为

$$n=\frac{2n_1R_1}{\frac{D_0+d_0}{2}\times\frac{H_0}{H}+H} \tag{5.4-23}$$

2）转动加速度。上式对时间求导数得环件转动加速度为

$$\frac{dn}{dt}=-\frac{2n_1R_1}{\left(\frac{D_0+d_0}{2}\times\frac{H_0}{H}+H\right)^2}\left(\frac{D_0+d_0}{2}\times\frac{H_0}{H^2}-1\right)v \tag{5.4-24}$$

3）转动影响因素。环件的转速与驱动辊转速和驱动辊半径成正比，与环件瞬时半径成反比。随着环件轧制中直径的扩大，环件转动速度逐渐减小。环件转动加速度与环件初始尺寸、瞬时尺寸和驱动辊尺寸、驱动辊转速以及轧制进给速度等因素有关，且环件转动加速度始终是一负数，亦即环件旋转运动是减速的。环件的最大旋转速度发生在环件轧制的开始时刻，最小旋转速度发生在环件轧制的结束时刻。

（4）轧制直线进给运动

直线进给运动用进给速度 v 表示。直线进给运动由轧环机的液压或气动进给机构提供，该运动参数对轧环机结构和环件轧制过程有重要影响。

1）直线进给速度。记 Δh、Δt 分别为环件轧制中每转轧制进给量（每转壁厚减小量）和该转轧制时间，则根据速度定义得直线进给速度 $v=\frac{\Delta h}{\Delta t}$。若不计轧制中环件与驱动辊接触面之间的滑动，则环件轧制一转的时间中驱动辊工作面所通过的距离等于该转轧制中环件的外圆周长即 $2\pi R=2\pi n_1R_1\Delta t$，由此得 $\Delta t=\frac{R}{n_1R_1}$。于是，直线进给速度为

$$v=\frac{n_1R_1\Delta h}{R} \tag{5.4-25}$$

2）进给速度的极限范围　由上式可知，环件轧制直线进给速度与每转进给量成正比。根据环件轧制条件，每转进给量 Δh 必须大于环件锻透所需的最小每转进给量 $\Delta h_{\min}$，同时又小于环件咬入所允许的最大每转进给量 $\Delta h_{\max}$。将 $\Delta h_{\min}$ 和 $\Delta h_{\max}$ 分别代入上式得环件轧制直线进给速度的极限范围为

$$v\geqslant v_{\min}=6.55\times10^{-3}n_1\frac{R_1^2}{R}\left(\frac{R}{R_1}-\frac{r}{R_1}\right)^2\left(1+\frac{R_1}{R_2}+\frac{R_1}{R}-\frac{R_1}{r}\right) \tag{5.4-26}$$

$$v\leqslant v_{\max}=\frac{2\beta^2n_1R_1^2}{R\left(1+\frac{R_1}{R_2}\right)^2}\left(1+\frac{R_1}{R_2}+\frac{R_1}{R}-\frac{R_1}{r}\right) \tag{5.4-27}$$

由上式可知，环件轧制最小进给速度 $v_{\min}$ 和最大进给速度 $v_{\max}$ 与环件尺寸、轧辊尺寸以及驱动辊转速等因素有关。当轧辊尺寸、驱动辊转速以及轧制摩擦为定值时，极限进给速度仅与环件尺寸有关。当环件轧制结束时刻，环件半径达到最大值，此时最小进给速度达到极小值。当环件轧制开始时刻，环件半径为最小值，此时最大进给速度达到极大值。

3）每转进给量　每转进给量是环件轧制直线进给运动的基本参数，对环件轧制进给运动和轧制过程有重要影响。以下分析每转进给量的计算和几种典型进给运动。

① 每转进给量计算　设环件经过 N 转轧制完成变形，环件在这 N 转轧制中出口厚度分别为 H_1，H_2，…，H_N，从 H_1 到 H_N 环件壁厚是逐渐减小的。记每转轧制完成时刻分别为 t_1，t_2，…，t_N，则环件壁厚随时间变化规律如图 5.4-10 所示。现考虑第 i 转轧制。该转轧制从 $i-1$ 转轧制完成时间 t_{i-1} 始，至时间 t_i 止。记该转进给量为 Δh_i，则由图 5.4-10 得每转进给量为

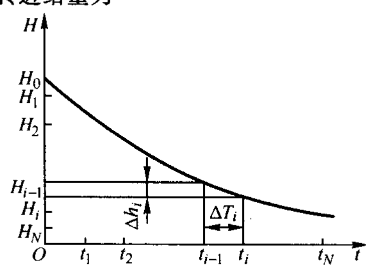


图 5.4-10　环件轧制中的壁厚变化

$$\Delta h_i=-\frac{1}{n_1D_1}\left(\frac{D_0+d_0}{2}\times\frac{H_0}{H_i}+H_i\right)\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}\bigg|_{t=t_i}$$

$$=\frac{v_i}{n_1D_1}\left(\frac{D_0+d_0}{2}\times\frac{H_0}{H_i}+H_i\right) \tag{5.4-28}$$

式中，$v_i=-\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}\Big|_{t=t_i}$ 为环件第 i 转轧制时的直线进给速度。

若环件轧制中每转进给量相差不大，则可用平均每转进给量表示每转进给量。将各参数的平均值代入上式得平均每转进给量为

$$\overline{\Delta h}=\frac{\bar{v}}{n_1D_1}\left(\frac{D_0+d_0}{2}\times\frac{H_0}{\overline{H}}+\overline{H}\right) \tag{5.4-29}$$

式中，$\overline{\Delta h}$ 为平均每转进给量；$\overline{H}=\frac{H_0+H}{2}$ 为环件的平均壁厚，这里 H_0、H 分别为环件开始轧制和轧制终了时的壁厚；$\bar{v}=\frac{H_0-H}{T}$ 为环件轧制平均进给速度，这里 T 为一个环件的轧制时间。

② 每转进给量为常数时的进给运动　当 $\Delta h_i=\Delta h$ 为常数时，则由式（5.4-28）可得

$$v_i=\frac{n_1D_1\Delta h}{\frac{D_0+d_0}{2}\times\frac{H_0}{H_i}+H_i} \tag{5.4-30}$$

上式表明，当每转进给量为常数时，环件轧制直线进给速度并不为常数，它与环件轧制中的瞬时壁厚有关，并随着环件壁厚变化而变化。当环件轧制中壁厚逐渐减小、直径逐渐增大时，直线进给速度也随之逐渐减小。

③ 进给速度为常数时的每转进给量　当 $v_i=v$ 为常数时，则由式（5.4-28）可知，每转进给量 Δh_i 并不为常数，它随着环件壁厚减小而增大。亦即在进给速度为常数时，每转进给量随着环件轧制过程的进行而逐渐增大。

4）进给运动的影响因素

① 轧制条件的影响　环件轧制中每转进给量、进给速度等进给运动参数与环件尺寸、轧辊尺寸、驱动辊转速等因素有关，其变化规律比较复杂。从轧制条件的角度来看，尽管环件轧制进给运动规律复杂，但必须在轧制条件的许可范围内。对于恒速进给的环件轧制，每转进给量是逐渐增大的。当轧制过程进行到每转进给量超过环件咬入所允许的最大每转进给量时，轧制过程将因环件不能咬入孔型而不能进行。如果这时环件轧制过程刚好完成，则这种情况是恒速进给的最大进给速度情况。

② 设备能力的影响　环件轧制直线进给运动是由轧环机的液压或气动装置来实现的。环件轧制条件所要求的进给速度要靠轧环机进给装置来保证。因而进给装置的力学参数和运动学参数对进给运动有直接影响。不管环件轧制每转进给量和进给速度的理论变化范围有多大，它们的实际取值只能在轧环机的能力范围内来确定。

（5）驱动辊旋转轧制运动

驱动辊旋转轧制运动是环件咬入孔型的动力源，又是轧环机电动机功率的作用形式。驱动辊旋转轧制运动由轧环机电动机和减速机构来提供，且通常是定速旋转运动。合理设计轧环机驱动辊转速，是轧环机设计的重要内容。

1）驱动辊转速　驱动辊旋转运动用转速 n_1 表示，其计算式为

$$n_1=\frac{vR}{R_1\Delta h} \tag{5.4-31}$$

由上式可知，驱动辊转速与环件尺寸、驱动辊尺寸、进给速度和每转进给量等因素有关。当进给速度、环件尺寸和轧辊尺寸给定时，驱动辊转速仅取决于每转进给量 Δh。若每转进给量取环件咬入所允许的最大每转进给量，则驱动辊转速达到最小值。若每转进给量取环件锻透所要求的最小每转进给量，则驱动辊转速达到最大值。因此，将最大每转进给量和最小每转进给量分别代入上式得驱动辊的极限转速为

$$n_1\geqslant n_{1\min}=\frac{0.5vR\left(1+\frac{R_1}{R_2}\right)^2}{\beta^2R_1^2\left(1+\frac{R_1}{R_2}+\frac{R_1}{R}-\frac{R_1}{r}\right)} \tag{5.4-32}$$

$$n_1\leqslant n_{1\max}=\frac{1.53\times10^2vR}{R_1^2\left(\frac{R}{R_1}-\frac{r}{R_1}\right)^2\left(1+\frac{R_1}{R_2}+\frac{R_1}{R}-\frac{R_1}{r}\right)} \tag{5.4-33}$$

式中，$n_{1\min}$、$n_{1\max}$ 为驱动辊的最小转速和最大转速。

2）驱动辊转速影响因素　若驱动辊转速位于［$n_{1\min}$，$n_{1\max}$］范围内，则环件轧制既满足咬入条件又满足锻透条件。所以从理论上来说，驱动辊转速可在［$n_{1\min}$，$n_{1\max}$］范围内取任意值。一般情况下，轧环机电动机功率是定值，通过变速机构传递到驱动辊的旋转轧制功率也是定值。若驱动辊的转速大，则它所能提供的力矩就小。反之，若驱动辊的转速小，则它所能提供的力矩就大。为了满足环件轧制所需



的轧制力矩，驱动辊转速就不能过大。此外，环件轧制的驱动辊线速度也是有一定要求的。若线速度过小，则环件轧制生产率低，轧制周期长，热轧环件容易冷却，进而使轧制变形抗力增大，这加重了轧制设备负荷。所以，驱动辊转速的选择应综合考虑驱动辊轧制力矩和驱动辊线速度等因素的影响。在满足环件轧制条件的前提下，只要兼顾到轧制力矩和驱动辊线速度，那么驱动辊转速选取定速或者选取变速都是可以的。现有的轧环机，其驱动辊转速都是采用定速，这对于轧制不同规格尺寸的环件和不同材料的环件，其适应性较差。驱动辊变转速（有级或无级）的轧环机，在环件轧制的适应性和轧制过程控制方面有优越性，有必要对这种轧环机进行研究和开发。

（6）轧制生产率

环件轧制生产率可用一个环件的轧制时间来表示。由轧制中环件壁厚减小速度的定义得 $v=-\dfrac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}$，那么一个环件轧制的时间 T 为

$$T=\int_0^T \mathrm{d}t=\int_0^{H_f}-\frac{\mathrm{d}H}{v}=\int_{H_f}^{H_0}\frac{\mathrm{d}H}{v}$$

式中，H 为环件轧制中瞬时环件壁厚；H_0、H_f 分别为环件初始壁厚和轧制结束时的壁厚。

根据此式积分得进给速度为常数时的轧制时间如下

$$T=\frac{H_0-H_f}{v} \tag{5.4-34}$$

2　变形主要特征和工艺参数

环件轧制通过连续局部塑性变形的积累使环件整体壁厚减小、直径扩大、截面轮廓成形，最终使环件成为一定形状尺寸的环形零件。环件轧制中，局部变形区产生厚度减小、周向伸长、轴向宽展的塑性变形，这种塑性变形的发生、发展和积累规律决定了环件轧制变形和成形规律。环件轧制变形和成形规律与环件形状密切相关，其中矩形截面环件轧制变形规律是其他各种形状环件轧制变形和成形规律的基础。在此基础上进一步分析复杂的非矩形截面环件轧制成形过程和可成形性。

2.1　矩形截面环件轧制变形规律

（1）塑性变形区分布

矩形截面环件轧制塑性变形区分布如图 5.4-11 所示。塑性变形区位于驱动辊与芯辊缝隙中的局部区域。由于塑性区的周向伸长变形，可能导致与变形区相对应的另一端的环件局部区域产生塑性铰。除此以外的环件其他大部分区域都为刚性区。由该图可知，环件轧制塑性变形区仅占环件体积的很小部分，而非塑性变形的刚性区占环件体积的绝大部分。也正是因为环件轧制塑性变形区所占体积很小，所以环件轧制变形力与整体模锻相比是很小的。环件轧制过程中，环件连续不断地咬入孔型（驱动辊与芯辊之间的缝隙），塑性变形区沿着环件的圆周方向连续不断地传播，使整个环件产生轧制塑性变形。在环件轧制塑性变形区中，其变形为径向壁厚减小，圆周方向伸长，轴向尺寸宽展。虽然环件轧制塑性变形区很小，但其变形却表现出了复杂的三维塑性变形性质。随着环件轧制过程的进行，环件壁厚不断减小，直径不断增大，环件轧制塑性变形区的形状和大小也在不断发生变化。从轧制的角度来看，驱动辊与芯辊的直径不同，使得环件轧制具有不对称轧制性质；驱动辊有动力驱动，芯辊无动力驱动，两者的转速也是不同的，使得环件轧制具有异步轧制性质；环件反复多次通过轧制孔型产生轧制变形才能获得一定形状尺寸的环形零件，这使得环件轧制具有多道次轧制性质。

（2）宽展变形

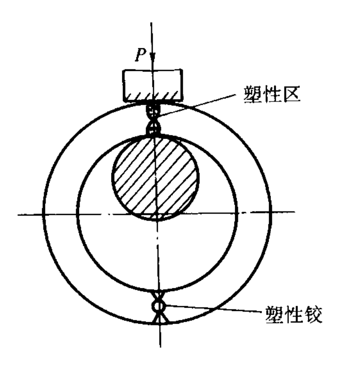


图 5.4-11　矩形截面环件轧制塑性变形区分布

宽展变形是指径向轧制条件下的环件轴向变形，它发生在环件的两个端面。在端面的中心附近，亦即在环件平均直径附近，宽展变形表现为环件轴向尺寸缩小。在端面的边界附近亦即在环件内、外直径附近，宽展变形表现为环件轴向尺寸增大。这种环件端面中心轴向尺寸缩小凹陷，端面边界轴向尺寸增大凸起的宽展变形如图 5.4-12 所示。由图中看出，环件沿轴向截面的宽展变形形状像鱼尾，所以，环件轧制生产中通常称宽展变形为鱼尾。由于环件轧制中端面宽展变形亦即鱼尾的产生，使得环件端面不平整，既增加了环件端面加工余量和加工工时，又增大了环件材料消耗。搞清楚鱼尾产生规律，控制鱼尾的产生和发展，对于环件轧制生产具有实际意义。

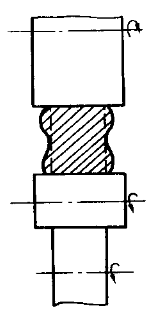


图 5.4-12　环件轧制宽展变形

环件轧制中的宽展导致环件自由端面产生鱼尾或鼓形缺陷，这种缺陷与宽展的数值和均匀性密切相关。由于很多因素都会影响到环件轧制中的宽展，所以从理论上无法给出宽展计算的解析表达式，为此需要通过环件轧制实验来确定宽展的主要影响因素和作用规律，从而为环件轧制生产中预测和控制宽展提供依据。实验研究表明，环件轧制直线进给速度对环件宽展变形影响最大。进给速度增大，环件外径和内径处的宽展显著减小，而环件中径处的宽展为增大变形，这使得整个环件自由端面宽展分布均匀，且平均宽展量减小，环件端面较为平整。若轧制中采用较小进给速度，则环件外径和内径处宽展显著增大，中径处宽展很小甚至产生负宽展或拉缩，整个环件自由端面鱼尾形状突出，凸凹变化剧烈。环件轧制进给速度与每转进给量成正比，进给速度大则每转进给量大，使得轧制塑性变形区较为均匀穿透整个环件壁厚，这有利于环件周向伸长变形和壁厚减小变形，并使环件轴向宽度变形均匀。当进给速度较小时，则每转进给量也较小，环件轧制塑性变形区主要集中于环件外圆和内孔表面附近，变形区沿环件壁厚分布极不均匀，其结果使得环件外圆表面和内孔表面处产生较大的宽展变形，环件中径处由于塑性区穿透区域较小甚至是未穿透，其宽展很小甚至是负宽展，而整个环件的圆周伸长变形很小，壁厚减小变形也很小。因而在小进给速度轧制时，环件宽展很不均匀，环件自由端面凸凹不平。

为了减小和控制宽展，环件轧制中应采用较大进给速度即快速进给轧制。当然，具体进给速度确定应与轧环机力能参数匹配，只能在轧环机许可的力能参数范围内选取，而不能任意选择。所以，通过进给速度来控制宽展受到了轧环机和轧制条件件的制约，其回旋余地是有限的。除了进给速度外，选用有侧壁的封闭和半封闭孔型进行轧制成形，对于减小和控制环件宽展也是非常有效的。彻底消除环件轧制中的宽展，需要采用径—轴向联合轧制轧环机。在径—轴向轧环机轧制时，径向轧制变形产生的轴向宽展可通过轴向轧制来消除，这种径向和轴向联合反复轧制可获得无宽展、端面平整的环件。

(3) 环件椭圆度

1) 椭圆度理论计算。在平稳轧制条件下，环件轮廓线为变形区的圆弧线（位于环件与轧辊接触区）和非变形区的螺旋线（位于环件与轧辊接触区以外的区域）构成。按照圆直径的定义，椭圆度定义的环件外、内轮廓椭圆度 e_1 和 e_2 分别为

$$e_1 = D_{max} - D_{min} = \frac{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R} - \frac{1}{r}}\Delta h$$

$$e_2 = d_{max} - d_{min} = \frac{\frac{1}{R_2} - \frac{1}{r}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R} - \frac{1}{r}}\Delta h \tag{5.4-35}$$

由上式中可知，环件在平稳轧制条件下其椭圆度与每转进给量成正比，而且还与环件轧制中的尺寸以及轧辊尺寸有关。通过对时间求导数得 $\frac{de_1}{dt} < 0$，$\frac{de_2}{dt} > 0$。这表明在每转进给量恒定的条件下，随着轧制过程的进行，环件外轮廓椭圆度逐渐减小，而内轮廓椭圆度逐渐增大。对上式分析可知，只要在轧制中环件半径增大到一定值以后，就会使环件外轮廓椭圆度小于内轮廓椭圆度。实际环件轧制中经常出现环件内轮廓椭圆度超过外轮廓椭圆度，也就是轧制成形的环件椭圆度并不与环件直径成正比的现象，其理论根据和产生机制就在于此。

2) 椭圆度控制。由环件椭圆度计算公式可知，椭圆度与每转进给量、轧辊尺寸、环件尺寸等因素有关。实际生产中，环件尺寸和轧辊尺寸是确定的亦即是不能随意改变的，所以环件椭圆度主要取决于每转进给量。若在环件轧制变形的后期，逐渐减小每转进给量，使 $\frac{d(\Delta h)}{dt} < 0$，这样有利于环件椭圆度的减小。特别是临近轧制变形结束时在每转进给量 $\Delta h = 0$ 的条件下，至少进行一转轧制（整形轧制），可使环件椭圆度达到最小值。以上控制环件椭圆度的措施是针对平稳环件轧制情况而言，若环件轧制过程中出现振动而不能保持平稳，那么会大大增加环件椭圆度。所以环件轧制中消除和控制振动，维持平稳轧制工况，是减小环件椭圆度的前提条件。

2.2 环件轧制工艺参数

环件轧制工艺参数与轧制用毛坯和轧制孔型一样，对环件轧制有着重要影响。即使有了合理的轧制用毛坯和轧制孔型，也会因为轧制工艺参数不合理而无法轧制成形合格的环件锻件。环件轧制工艺参数主要有：轧制比、轧制温度、轧制压力和力矩、每转轧制进给量、轧制进给速度、轧制时间等，具体工艺参数的设计要综合考虑轧制变形规律、轧制条件、轧制设备力能参数等多方面因素。

(1) 轧辊极限直径

为了使环件既能连续咬入轧制孔型，又能锻透，则轧制中环件锻透所需的最小每转进给量不得超过环件咬入所允许的最大每转进给量即 $\Delta h_{min} \leqslant \Delta h_{max}$。由此可得轧辊工作面极限半径为

$$\begin{cases} R_1 \geqslant R_{1min} = \dfrac{R_2\ (R-r)}{17.5\beta R_2 - \ (R-r)} \\ R_2 \geqslant R_{2min} = \dfrac{R_1\ (R-r)}{17.5\beta R_1 - \ (R-r)} \end{cases} \tag{5.4-36}$$

式中，R_{1min}、R_{2min} 分别为驱动辊和芯辊工作面的最小半径。当然，它们的最大半径也有限制。对于芯辊，其工作面最大半径不得大于环件毛坯内孔半径，否则毛坯不能套入芯辊。对于驱动辊，其工作面最大半径也受到轧环机所允许的驱动辊与芯辊中心距尺寸限制。所设计的轧辊径向尺寸应按其极限尺寸进行校核。

(2) 环件极限壁厚

根据环件轧制锻透条件、咬入条件和刚度条件可得环件毛坯的最大壁厚 H_{max} 和环件锻件最小壁厚 H_{min} 为

$$\begin{cases} H \leqslant H_{max} = \dfrac{17.5\beta R_1}{1 + \dfrac{R_1}{R_2}} \\ H \geqslant H_{min} = 0.183\left(1 + \dfrac{R_1}{R_2}\right)\dfrac{r_{a0} H_0}{R_1} \end{cases} \tag{5.4-37}$$

式中，r_{a0} 为轧制前的环件毛坯平均半径；H_0 为轧制前的环件毛坯壁厚。

轧制的环件锻件壁厚和相应的环件毛坯壁厚应按照环件的极限壁厚进行校核。

(3) 轧制比

轧制比简称轧比，它定义为轧制前的环件毛坯截面积与轧制后的环件锻件截面积之比

$$\lambda = \frac{A_0}{A}$$

式中，λ 为轧比；A_0 为轧制前的环件毛坯截面积；A 为轧制后的环件锻件截面积。

轧比从宏观上反映了环件轧制变形程度，它对轧制孔型和轧制用毛坯设计以及轧制过程的顺利进行有重要影响。若用封闭孔型轧制矩形截面环件，则由于环件轴向尺寸不变，轧比可以用环件毛坯壁厚与环件锻件壁厚之比表示

$$\lambda = \frac{A_0}{A} = \frac{B_0 H_0}{BH} = \frac{H_0}{H} \tag{5.4-38}$$

对于开式孔型轧制矩形截面环件，由于宽展较小可以忽略，其轧比仍可用上式表示。若环件毛坯壁厚为最大壁厚，环件锻件为最小壁厚，这时的轧比为最大轧比 λ_{max}

$$\lambda_{max} = \frac{5.5}{\frac{r_{a0}}{R_1}\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)} \tag{5.4-39}$$

由上式知，若要增大轧比，可以增大轧辊半径，减小环件毛坯的平均半径。作为一种极限情况，取 $r_{a0} \to R_2$，$\frac{R_2}{R_1} \to 0$，则由上式得最大轧比的极限值为

$$\lim \lambda_{max} = 5.5 \tag{5.4-40}$$

该值是环件轧制的理大理论轧比，实际轧制生产中是不可能达到此值的，但轧比的具体数值可按此值校核。环件轧制工艺设计中，为了计算方便通常用轧制后的环件锻件孔径 d 与轧制前的环件毛坯孔径 d_0 之比值来表示轧比，这个轧比记作当量轧比 K

$$K = \frac{d}{d_0} \tag{5.4-41}$$

根据环件的几何关系并忽略宽展得，轧比 λ 和当量轧比 K 关系为



$$K=\left(1+\frac{D_0}{d_0}\right)\lambda-\frac{D}{d_0} \quad (5.4\text{-}42)$$

上式表明，当量轧比 K 与轧比 λ 成正比。需要指出的是，这个结论的前提条件是忽略宽展的矩形截面环件轧制。也就是说，在无宽展的矩形截面环件轧制时，轧比与当量轧比是等价的。而在非矩形截面环件轧制和径—轴向联合轧制时，轧比有明确的物理意义，当量轧比则不能准确反映环件轧制变形程度。一般情况下，$\lambda D_0 \geqslant D$，所以由上式可得 $K \geqslant \lambda$。这也就是说当量轧比的取值范围比轧比的取值范围大。设计中，轧比或当量轧比的具体取值应考虑如下因素。

1）增大轧比有利于提高环件锻件内部质量，但会延长轧制时间，降低轧制生产率。

2）环件锻件截面形状复杂时，轧比应取较大值。

3）轧制前环件毛坯的壁厚不均、几何精度低，轧比应取较大值。

4）制坯工步生产率高、生产节拍快，轧比应取较小值，以满足生产节拍的匹配要求。

5）环件锻件孔径较小，轧比应取较小值，以保证芯辊的直径和强度。

6）用较小的设备生产较大直径的环件锻件时，轧比可取较大值。

在实际环件轧制生产中，有些工艺如套锻—轧制工艺、塔形—轧制工艺，如果内圈不需轧制，仅轧制外圈，则外圈环件毛坯的内径等于内圈外径，轧比已自然确定，而不需选取。有些轴承生产厂，由于环件毛坯制造工序的冲头尺寸已实现系列化，则毛坯孔径需按系列套用，因而轧比也是系列化的，而不需选取。

(4) 轧制温度和压力

1）轧制温度。环件的轧制温度在很大程度上决定了环件的塑性变形能力和轧制抗力。轧制温度按环件材料的锻造温度范围确定。一般钢材的锻造温度范围较宽，所以轧制温度选择的回旋余地也较大。在一火加热制坯和轧制的情况下，由于制坯时间的波动和延长，以致轧制温度降低，影响轧制变形的顺利进行，这时应控制轧制温度的下限值，不合要求的环件毛坯应返炉加热。高合金钢和有色合金的轧制温度范围较窄，且轧制温度不仅影响到塑性和变形力，还影响到组织相变，它们的轧制温度应予以特别注意。

2）轧制压力。环件的轧制压力、轧制力矩、轧制功率都应在轧制设备的额定力能参数范围内，它们的设计计算可参考轧制力能计算方法。环件轧制工艺设计中，一般情况是计算轧制压力，大型环件轧制、高合金钢和有色合金环件轧制还应计算轧制力矩和轧制功率。若环件轧制压力、轧制力矩、轧制功率超出了轧环机的额定值，则可通过减小每转进给量、提高轧制温度来予以调整。

(5) 每转进给量

从轧制条件来看，环件轧制的每转进给量不得小于锻透所要求的最小每转进给量，同时又不得大于咬入孔型所允许的最大每转进给量即

$$\Delta h_{min} \leqslant \Delta h \leqslant \Delta h_{max} \quad (5.4\text{-}43)$$

由于 Δh_{min}、Δh_{max} 所决定的每转进给量范围较大，所以每转进给量 Δh 的取值可以有较大的变化。一般来说，环件轧制温度较高、轧环机力能较富裕的，每转进给量可取较大值。在轧制工艺设计时，每转进给量可先按轧环机吨位进行设计，再按照环件轧制的锻透条件和咬入条件进行校核。若每转进给量不满足轧制条件，可以考虑提高轧制温度来增大每转进给量，或者考虑降低轧制压力来减小每转进给量。如果仍然不满足轧制条件，则要修改环件毛坯尺寸或者是轧辊尺寸。

(6) 进给速度和轧制时间

环件轧制中，通常驱动辊的旋转轧制速度是固定的，而直线进给速度则是根据轧制工艺的需要而确定的。在驱动辊转速固定的情况下，直线进给速度的大小直接影响到每转进给量和轧制时间。进给速度大，则每转进给量大，轧制时间短，而且每转进给量的大小，也是通过进给速度来控制和实现的。

1）进给速度。在进给速度设计中，可按照轧制设备所能提供的每转进给量 Δh_p 和环件毛坯与锻件的平均外半径初步确定进给速度 v_p

$$v_p=\frac{n_1 R_1 \Delta h_p}{R_m} \quad (5.4\text{-}44)$$

式中，R_m 为环件毛坯和锻件的外半径平均值。

根据环件轧制运动学分别计算出最小进给速度 v_{min} 和最大进给度 v_{max}，对初选的进给速度进行校核，使进给速度位于极限范围之内

$$v_{min} \leqslant v_p \leqslant v_{max} \quad (5.4\text{-}45)$$

以上所设计的进给速度分别满足轧制设备力能条件和环件轧制条件要求，是可以实现的进给速度。

2）轧制时间。轧制时间是指环件开始轧制至轧制变形结束所经历的时间，它是表征环件轧制工艺生产率的参数，也是用于进行环件制坯和轧制成形工步间匹配设计以及估算环件轧制中的温度降低幅度的重要依据。在环件轧制工艺设计中，可以按照设备所能提供的进给速度 v_p 来计算轧制时间 T_p

$$T_p=\frac{H_0-H_f}{v_p} \quad (5.4\text{-}46)$$

式中，T_p 为轧制时间；v_p 为设备所能提供的进给速度；H_0 为环件毛坯的壁厚；H_f 为环件锻件的壁厚。

上式计算出的是轧制设备完成轧制变形的最短时间，也就是轧制设备生产中所能达到的最快节奏。

(7) 轧制工艺规程

环件轧制过程大致可分为三个阶段：①开始轧制咬入孔型阶段；②稳定轧制阶段；③整形轧制阶段。第一个阶段，环件从静止状态过渡到连续咬入孔型的转动状态，且每转进给量达到设计值。第二阶段，环件轧制过程以近似恒定的进给速度进行，直至环件的径向尺寸接近锻件尺寸。第三阶段，轧制进给速度逐渐减小直至轧制变形结束，进给运动停止。此阶段通过减小进给速度亦即减小每转进给量，对环件进行整形轧制，使环件壁厚均匀、形状圆整。环件轧制工艺规程设计，就是要合理分配轧制变形的三个阶段，从而获得合格的环件锻件。

若以轧制进给速度为纵坐标，以轧制时间为横坐标，则环件轧制过程可用图 5.4-13 表示。在第一阶段的轧制状态建立时，若轧制时间太短，亦即进给速度太快，则有可能使环件产生压扁而不能咬入孔型。若此阶段的轧制时间太长，亦即进给速度太慢（每转进给量太小），则有可能使环件不能锻透而无法产生壁厚减小和径向扩大的轧制变形。第二阶段的轧制进给速度应满足环件轧制条件和轧制设备力能条件，如有可能，宜用较大的进给速度进行快速轧制变形。第三阶段的整形轧制中，进给速度逐渐减小，既可以使轧制结束阶段的环件直径快速增长变为环件直径缓慢增长，从而防止环件直径的惯性轧制超差；又可以通过小的进给速度获得较小的每转进给量，对环件进行整形，从而减小环件的椭圆度和壁厚差。当进给速度为零亦即停止进给时，至少进行一转的整形轧制，对于提高环件的形状尺寸精度是有利的。与第一阶段的轧制时间相比，第三阶段的轧制时间更长一些。在 D51 型轧环机的轧制工艺中，因轧环机的控制系统为手动控制系统，轧制工艺规程的实现有赖于设备操作者的技能和



经验。对于带有计算机控制系统的轧环机，需要将轧制过程各个阶段的工艺参数输入计算机，通过计算机控制系统自动实现所要求的轧制工艺规程。

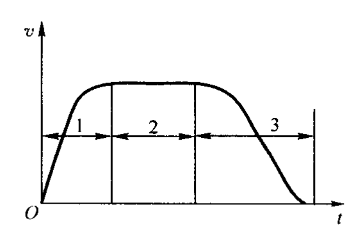


图 5.4-13 环件轧制过程

3 环件轧制力能参数

环件轧制力能计算不仅是环件轧制孔型设计和轧制工艺进给设计的依据，而且也是轧环机结构设计、工作参数设计和机电液部件选择的依据。

3.1 环件闭式轧制力能计算

环件闭式轧制如图 5.4-14 所示，这种轧制中环件两个端面封闭于轧制孔型内部，环件轴向宽展变形受到孔型侧壁限制。应用连续速度场上限法对环件闭式轧制力能计算进行分析和求解得

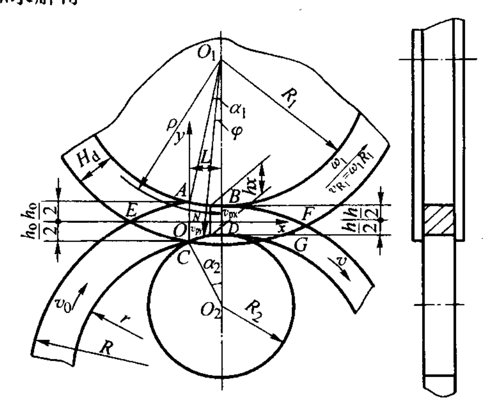


图 5.4-14 环件闭式轧制

1）闭式轧制力

$$P=2kbL\left(1+\frac{1}{4}\frac{h_0}{L}+\frac{3}{8}m\frac{L}{h_0}+\frac{3}{4}m\frac{L}{b}\right) \qquad (5.4\text{-}47)$$

2）单位面积闭式轧制力

$$p=\frac{P}{bL}=2k\left(1+\frac{1}{4}\frac{h_0}{L}+\frac{3}{8}m\frac{L}{h_0}+\frac{3}{4}m\frac{L}{b}\right) \qquad (5.4\text{-}48)$$

3）闭式轧制力矩

$$M=2kbR_1\Delta h\left(1+\frac{1}{4}\frac{h_0}{L}+\frac{3}{8}m\frac{L}{h_0}+\frac{3}{4}m\frac{L}{b}\right) \qquad (5.4\text{-}49)$$

4）电机功率计算　驱动辊力矩由轧环机电动机提供。记 i 为电动机到驱动辊传动比，η 为传动效率，则所需电动机驱动力矩 M_e 为

$$M_e=\frac{M}{i\eta} \qquad (5.4\text{-}50)$$

记 n_e 为电动机转速，λ 为电动机过载系数，则所需电动机功率 N_e 为

$$N_e=\frac{\pi n_e}{30}\times\frac{M}{i\eta\lambda} \qquad (5.4\text{-}51)$$

3.2 环件开式轧制力能计算

环件开式轧制如图 5.4-15 所示，所谓开式是指环件两个端面不受孔型限制，即驱动辊和芯辊都为简单的圆柱形状，环件在两辊缝隙中产生轧制变形。用连续速度场的上限法计算环件开式轧制的轧制力和力矩，与环件闭式轧制力能计算过程是相同的。若以环件闭式轧制力能计算上限公式为基础，仅需去掉与端面摩擦有关的项就可得到环件开式轧制的力能计算公式。于是，环件开式轧制制力 P、单位面积轧制力 p 和轧制力矩 M 为

$$P=2kbL\left(1+\frac{1}{4}\frac{h_0}{L}+\frac{3}{8}m\frac{L}{h_0}\right) \qquad (5.4\text{-}52)$$

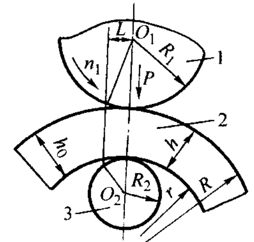


图 5.4-15 环件开式轧制

$$p=2k\left(1+\frac{1}{4}\frac{h_0}{L}+\frac{3}{8}m\frac{L}{h_0}\right) \qquad (5.4\text{-}53)$$

$$M=2kbR_1\Delta h\left(1+\frac{1}{4}\frac{h_0}{L}+\frac{3}{8}m\frac{L}{h_0}\right) \qquad (5.4\text{-}54)$$

3.3 阶梯孔环件闭式轧制力能计算

为了保证形状和尺寸精度，阶梯孔环件轧制通常采用封闭孔型，如图 5.4-16 所示。采用连续速度场上限法计算，可得阶梯孔环件闭式轧制力能参数如下。

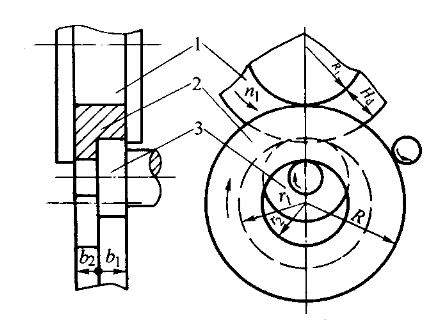


图 5.4-16 阶梯孔环件闭式轧制

轧制力

$$P=2kL\left\{b_1+b_2+\frac{L}{4}\left[1+3m-\frac{h_{10}}{h_{20}}+\frac{b_1h_{10}+b_2h_{20}}{L^2}+\frac{3}{2}m\left(\frac{b_1}{h_{10}}+\frac{b_2}{h_{20}}\right)\right]\right\} \qquad (5.4\text{-}55)$$

单位轧制力

$$p=2k\left\{1+\frac{L}{4}\frac{L}{b_1+b_2}\left[1+3m-\frac{h_{10}}{h_{20}}+\frac{b_1h_{10}+b_2h_{20}}{L^2}+\frac{3}{2}m\left(\frac{b_1}{h_{10}}+\frac{b_2}{h_{20}}\right)\right]\right\} \qquad (5.4\text{-}56)$$

轧制力矩

$$M=2kR_1\Delta h\left\{b_1+b_2+\frac{L}{4}\left[1+3m-\frac{h_{10}}{h_{20}}+\frac{b_1h_{10}+b_2h_{20}}{L^2}+\frac{3}{2}m\left(\frac{b_1}{h_{10}}+\frac{b_2}{h_{20}}\right)\right]\right\} \qquad (5.4\text{-}57)$$

3.4 力能计算举例

闭式轧制轴承套圈的毛坯和锻件如图 5.4-17 所示。轧制参数为：驱动辊直径 $D_1=360$ mm，芯辊直径 $D_2=89$ mm，驱动辊转速 $n_1=115$ r/min，孔型深度 $H_d=30$ mm，每转进给量 $\Delta h=0.7$ mm，环件轧制的终轧温度为900℃，该温度下环



件材料GCr15轴承钢的屈服强度 $\sigma_s = 90$ MPa，抗剪强度 $K = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} = 52$ MPa，终轧温度下的孔型轧制摩擦因数 $\mu = 0.3$，相应的摩擦因子 $m = 0.6$。根据这些参数和环件闭式轧制力能参数上限计算公式，计算轴承套圈闭式轧制力和力矩如下。

（1）接触弧长

$$L = \sqrt{\frac{2\Delta h}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R} - \frac{1}{r}}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 0.7}{\frac{1}{180} + \frac{1}{44.5} + \frac{1}{122.5} - \frac{1}{101}}} = 7.3 \text{ mm}$$

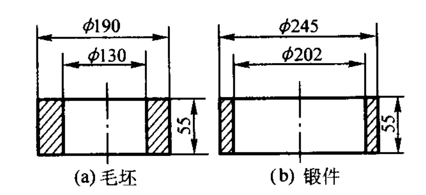


图 5.4-17 闭式轧制轴承套圈毛坯和锻件

（2）单位面积轧制力

$$p = 2k\left(1 + \frac{1}{4}\frac{h_0}{L} + \frac{3}{8}m\frac{L}{h_0} + \frac{3}{4}m\frac{L}{b}\right)$$

$$= 2 \times 52 \times \left(1 + \frac{1}{4}\frac{21.5}{7.3} + \frac{3}{8} \times 0.6\frac{7.3}{21.5} + \frac{3}{4} \times 0.6 \times \frac{7.3}{55}\right)\text{MPa}$$

$$= 104 \times (1 + 0.736 + 0.076 + 0.060)\text{MPa} = 194.7 \text{ MPa}$$

（3）轧制力

$$P = pbL = 194.7 \times 55 \times 7.3 \text{ N} = 78\ 172 \text{ N}$$

（4）轧制力矩

$$M = 2kbR_1\Delta h\left(1 + \frac{1}{4}\frac{h_0}{L} + \frac{3}{8}m\frac{L}{h_0} + \frac{3}{4}m\frac{L}{b}\right)$$

$$= 2 \times 52 \times 180 \times 0.7 \times \left(1 + \frac{1}{4} \times \frac{21.5}{7.3} + \frac{3}{8} \times 0.6 \times \frac{7.3}{21.5} \text{ N·mm} + \frac{3}{4} \times 0.6 \times \frac{7.3}{55}\right) \text{ N·mm}$$

$$= 1\ 349 \times 10^3 \text{ N·mm} = 1\ 349 \text{ N·m}$$

3.5 环件轧制力和力矩影响因素

环件轧制力和轧制力矩的影响因素有：环件材料性能、环件尺寸、轧制孔型尺寸、每转进给量、接触弧长和轧制摩擦等。其中，环件材料性能与轧制温度有关，每转进给量和接触弧长与环件轧制进给速度有关。所以，环件轧制力和力矩的影响因素是较多的，而且影响规律也是较复杂的。通过环件轧制实验，有关因素对环件轧制力和力矩的影响规律如下。

（1）环件瞬时尺寸的影响

随着环件轧制过程的进行，环件内外直径不断扩大。若以 $R_m = \frac{R + r}{2}$ 表示环件轧制中瞬时平均半径，则环件瞬时平均半径对轧制力和力矩的影响如图5.4-18和图5.4-19所示。轧制实验所用环件材料为SAE－AISI1045钢材，轧制温度范围为1 000～900℃，驱动辊半径 $R_1 = 275$ mm，芯辊半径 $R_2 = 45$ mm，环件毛坯外径 $D_0 = 215$ mm，环件毛坯内径 $D_i = 120$ mm，环件轴向宽度 $b = 52$ mm，驱动辊转速为 $n_1 = 47$ r/min。由图5.4-18可知，随着环件瞬时平均半径的增大，轧制力缓慢降低，但变化量很小。不同进给速度下，环件轧制力在轧制过程中都变化很小，因此可认为环件轧制中，只要进给速度恒定，其轧制力也是恒定的。由图5.4-19可知，对于给定的轧制进给速度，轧制力矩随着环件瞬时平均半径的增大而缓慢增大。进给速度大的对应的轧制力矩也大。

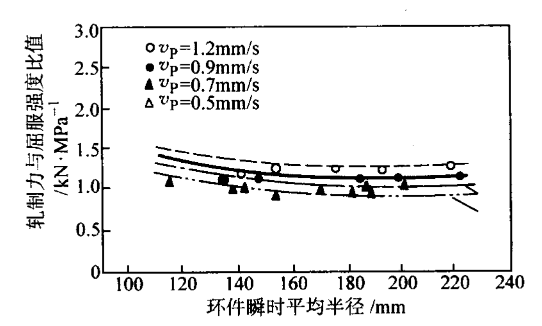


图 5.4-18 环件瞬时平均半径对轧制力的影响

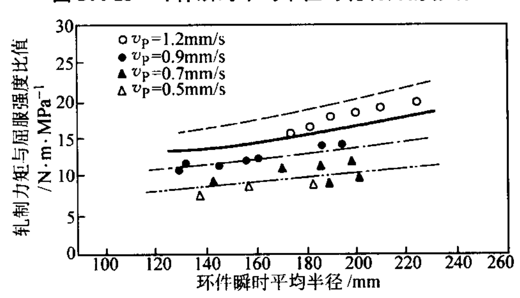


图 5.4-19 环件瞬时平均半径对轧制力矩的影响

（2）轧制进给速度的影响

环件轧制进给速度对轧制力和轧制力矩的影响如图5.4-20和图5.4-21所示。图5.4-20环件轧制实验中的驱动辊半径 $R_1 = 275$ mm，芯辊半径 $R_2 = 45$ mm，环件毛坯外径 $D_0 = 215$ mm，环件毛坯内径 $D_i = 120$ mm，环件轴向宽度 $b = 52$ mm，驱动辊转速为 $n_1 = 47$ r/min。图5.4-21环件轧制实验的驱动辊半径 $R_1 = 275$ mm，芯辊半径 $R_2 = 55$ mm，环件毛坯外径 $D_0 = 304$ mm，环件毛坯内径 $D_i = 164$ mm，环件轴向宽度 $b = 54$ mm，驱动辊转速为 $n_1 = 47$ r/min。由图5.4-20可知，对于一定的环件平均半径 R_m，随着环件轧制进给速度增大，其轧制力增大，进给速度与轧制力的关系接近于

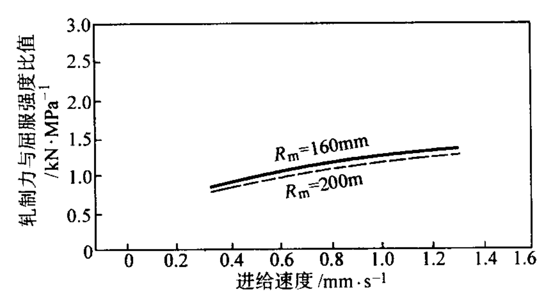


图 5.4-20 进给速度对轧制力的影响

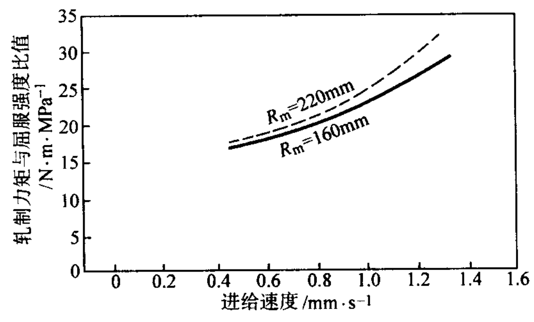


图 5.4-21 进给速度对轧制力矩的影响



线性关系。由图 5.4-21 可知，对于一定的环件平均半径 R_m，环件轧制力矩随着轧制进给速度的增大而增大。在相同的进给速度条件下，环件平均半径大的对应的轧制力小，而环件平均半径小的对应的轧制力大。对于轧制力矩，在相同进给速度条件下，环件平均半径小的对应的轧制力矩小，环件平均半径大的对应的轧制力矩大。

（3）芯辊尺寸的影响

芯辊尺寸对环件轧制过程力矩的影响如图 5.4-22 所示。该图轧制实验的驱动辊半径 $R_1 = 275$ mm，环件毛坯外径 $D_0 = 215$ mm，环件毛坯内径 $D_i = 120$ mm，环件轴向宽度 $b = 52$ mm，驱动辊转速为 $n_1 = 47$ r/min，轧制进给速度 $v_p = 0.7$ mm/s。由图 5.4-22 可知，对于一定的芯辊半径 R_2，轧制力矩随环件平均半径增大而增大。对于一定的环件平均半径，轧制力矩随着芯辊半径增大而减小，而随着芯辊半径减小轧制力矩增大。

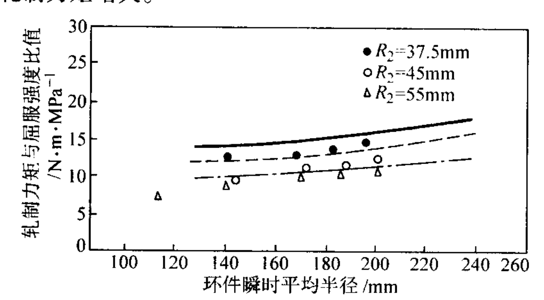


图 5.4-22 芯辊尺寸对轧制力矩的影响

（4）驱动辊转速的影响

驱动辊转速对轧制力矩的影响如图 5.4-23 所示。该图轧制实验驱动辊半径 $R_1 = 275$ mm，芯辊半径 $R_2 = 45$ mm，环件毛坯外径 $D_0 = 304$ mm，环件毛坯内径 $D_i = 164$ mm，环件轴向宽度 $b = 54$ mm，进给速度 $v_p = 0.9$ mm/s。由图 5.4-23 可知，在给定进给速度和环件平均半径的条件下，随着驱动辊转速增大轧制力矩减小，而驱动辊转速减小轧制力矩增大。

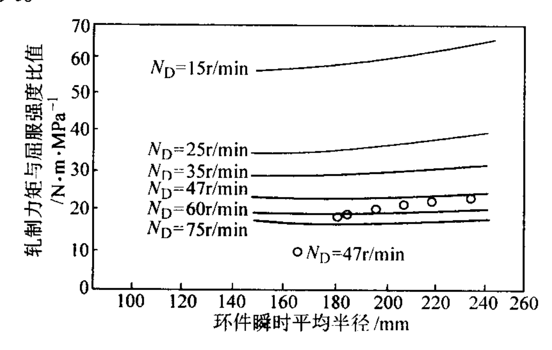


图 5.4-23 驱动辊转速对轧制力矩的影响

4 环件轧制工艺与模具设计

环件轧制工艺流程为下料—加热—制坯—轧制—后续处理，工艺流程中的各个工序、工步都要相互衔接、密切配合，才能使轧制生产稳定进行。

4.1 下料

环件轧制用的原材料有各种钢材和有色合金，原材料的化学成分、力学物理性能差异很大，原材料截面形状有圆形、方形，而且尺寸规格多样，所以环件轧制的原材料下料方法也是多种多样的。除了特大型环件轧制直接采用铸锭作为原材料外，一般环件轧制都采用棒材作为原材料，相应的下料方法有剪切、锯切、车切、折断、剁切、火焰切割等，以剪切和锯切应用较多。环件轧制下料工序的基本要求是：保证料段端面平整和重量精度。

4.2 加热

环件轧制用毛坯通常采用热锻制坯，环件轧制大多也采用热态轧制，所以加热是环件轧制工艺流程中广泛采用的工序。加热的目的是提高金属塑性，降低变形抗力，使之易于流动成形并获得良好的锻后组织。加热方法有火焰加热（包括煤加热、油加热和气体加热）和电加热（包括感应加热、接触电加热、电阻炉加热、盐浴炉加热）两大类，不同加热方法的能耗、生产率、环境污染等有着较大的差异。环件材料品种很多，不仅有普通的碳素钢，还有高合金钢和有色合金。环件尺寸规格变化范围很大，有直径 ϕ50 mm 的小型轴承套圈，也有直径 ϕ10 000 mm 的巨型环件。由于环件材料和尺寸的多样性，所以环件加热设备、加热条件、加热要求的差异很大。环件轧制加热必须综合考虑环件材料、尺寸、轧制生产特点。

环件轧制加热有棒料毛坯加热和环件毛坯加热之分。棒料毛坯加热是为轧制用环件毛坯的锻造制坯服务的，而轧制用环件毛坯加热是为热态环件轧制服务的。一般情况下，环件轧制加热需要二火加热，具体工艺线路为：下料—加热—制坯—加热—轧制。若一火加热不能完成环件的锻造成形，则制坯工步就需要反复多火次加热。轧制工步也有这种情况，一火加热不能完成轧制成形时，则要采用二火或多火次加热来完成轧制成形。大型环件毛坯或复杂环件毛坯制坯时，二火或多火加热较常见。多道次环件轧制时，轧制工步较多采用二火或多火加热。对于一些锻造温度范围较宽的环件材料，只要其制坯设备和轧制设备力能足够大，通过合理设计制坯工装、轧制孔型，优化制坯和轧制工艺操作，快速传递坯料，也可以在一火加热条件下完成制坯和轧制两个工步。

环件轧制通常是二火加热，其烧损量较大，需要在下料时予以补偿。若加热时间和加热气氛有较大波动，则会使坯料烧损量产生较大波动，这对轧制成形的环件形状尺寸精度有严重影响，有时甚至使环件报废。

制坯前的棒料与制坯后的环件毛坯，两者在形状尺寸上有较大差别，它们对加热炉的炉膛尺寸要求不同。若制坯前的棒料采用感应炉加热，则制坯后的环件毛坯要另外采用室式炉加热。若要求棒料和环件毛坯都能在一个炉内加热，则加热炉应采用室式煤气炉、油炉、煤炉或电阻炉。即使采用感应电炉加热一火能同时完成制坯和轧制两个工步，那么环件的制坯次品和轧制成形次品返修加热也需要再配置一台室式加热炉。

从生产率来看，环件轧制的制坯工步和轧制成形工步都是很快的，其加热工步是制约环件轧制生产率的主要因素。在中小型环件轧制生产中，加热设备的选择和配置要充分考虑到生产率的因素。若棒料采用感应加热，制坯后的热态环件毛坯立即放入室式炉加热，则环件轧制可获得较高的生产率。

环件毛坯加热要充分热透，尤其是在冷态环件毛坯加热时更应注意保证足够的均热时间。否则，加热不均匀的环件毛坯在轧制成形时，环件毛坯各部分变形抗力的不均匀将会使轧制过程产生振动甚至是强烈振动，大大损害了轧制环件的形状尺寸精度，严重时会使环件压扁，轧制过程中断，芯辊折断，甚至损坏轧制设备。环件毛坯的均匀加热，不仅与加热时间有关，而且与环件毛坯在炉内的堆放也有关。环件轧制生产中，要针对环件毛坯和加热炉的具体情况，注意总结经验教训，保证均匀加热。



4.3 环件锻件和毛坯设计

环件轧制用毛坯对环件轧制成形的影响是决定性的，不合理的轧制用毛坯是无法轧制成形合格的环件锻件的。环件轧制用毛坯决定了体积的初始分配、轧制变形程度和金属流动状况，其设计依据是环件锻件图和环件轧制成形流动规律，当然还要考虑到制坯和环件毛坯放入轧制孔型的方便。环件轧制用毛坯设计的影响因素多，影响规律复杂，设计难度大。生产实践中，所设计的轧制用环件毛坯通常要经过轧制成形调试修改后才能确定。

（1）环件锻件图设计

环件锻件图既是轧制用环件毛坯的设计依据，又是环件轧制工艺、轧制孔型设计依据，同时还是环件轧制产品检验依据。环件锻件图是在环件零件图基础上，考虑加工余量、轧制公差、轧制余块等绘制而成的。

1）环件锻件分类。环件零件品种繁多、形状各异、尺寸大小悬殊，但其锻件都是回转体的空心圆环结构，在形状结构上有一定的相似性。根据截面形状特点，可以将轧制成形的环件锻件分为如图5.4-24所示的七大类型：图a为圆筒形环件；图b为内沟形环件；图c为外沟形环件；图d为内锥形环件；图e为外锥形环件；图f为内外十字形环件；图g为内外梯形环件。

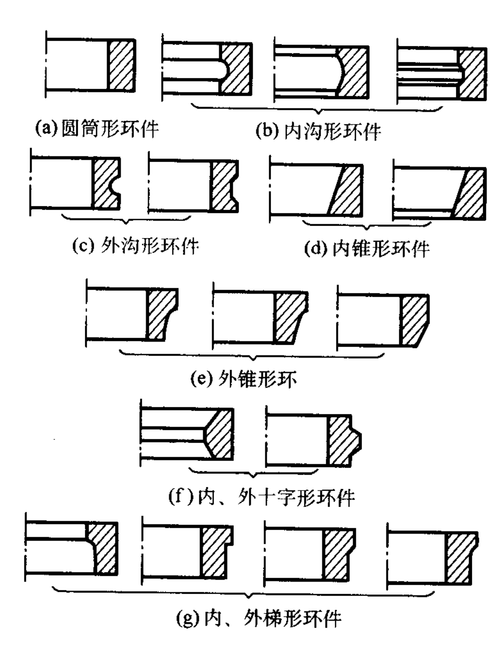


图5.4-24 环件锻件分类

2）环件锻件的余量和公差。轧制成形的环件锻件尺寸精度和表面粗糙度达不到零件图要求时，则环件锻件需要进行后续机加工。环件锻件表面为了几何精度而预留的机械加工金属层，称为机械加工余量。环件零件的公称尺寸加上机械加工余量，称为环件锻件的公称尺寸。实际环件轧制生产中，由于轧制温度、压力、速度的波动，轧制孔型和轧制设备状态的变化以及工人操作水平的不同，特别是轧制用毛坯重量的误差，轧制的环件锻件实际尺寸不可能等于其公称尺寸，应允许两者之间有一定的误差，这个误差称为轧制公差。环件锻件不论是需要机械加工的部分还是不需要机械加工的黑皮部分，都应注明轧制公差。环件锻件的轧制公差，一般为余量的$\frac{1}{3}\sim\frac{1}{2}$。为了简化环件锻件形状，便于轧制成形，在环件零件的某些部位添加一部分大于余量的金属，这部分添加的金属称为轧制余块。余块可通过后续机加工予以切掉。环件锻件的余量和公差的确定参见表5.4-1。对于某些复杂环件锻件和大型环件锻件，其余量和公差数值可根据环件零件的使用要求，与用户协商确定。

表5.4-1 轧制环件锻件余量和公差 mm

成品外径		外径		内径		高度	
>	≤	余量	公差	余量	公差	余量	公差
	80	3	+1 -0.5	-3	+0.5 -2	3	+1.5
80	120	3	+1 -0.5	-3	+0.5 -2	3	+1.5
120	150	3	+1 -0.5	-3	+0.5 -2	3	+1.5
150	180	3.5	+1 -0.5	-3	+0.5 -2	3.5	+1.5
180	220	3.5	+1 -0.5	-3.5	+0.5 -2	3.5	+1.5
220	250	4.5	±1	-4	+1 -3	3.5	+1.5
250	300	5	±1	-4.5	+1 -3	4	+2
300	350	5.5	±1	-5	+1 -3	5	+2
350	400	6	+2 -1	-6	+1 -4	6	+2
400	450	7	+2 -1	-7	+1 -4	7	+3
450	500	9	±2	-8	+1 -4	8	+3
500	550	10	±2	-9	+1 -4	10	+4
550	600	12	±2	-10	+1 -4	11	+4
600	650	14	±3	-12	+1 -4	12	+4
650	700	16	±3	-14	+1 -4	13	+5
700	800	18	±3	-16	+1 -4	15	+5

注：当采用校正工序时，余量和公差值可适当减小。

3）环件锻件的技术条件。轧制成形的环件锻件不仅会产生几何尺寸误差，而且会产生几何形状误差、表面缺陷和内部缺陷。几何尺寸误差按环件锻件的尺寸公差予以规定，几何形状误差、表面缺陷和内部缺陷则按环件锻件的技术条件予以规定，所以环件锻件的技术条件同样是其质量评价和产品验收的重要依据。

（2）环件毛坯设计原理和方法。

1）环件毛坯设计原理。环件毛坯设计的依据是环件锻件图和环件轧制金属流动规律。设计原理为：基于环件轧制中的体积不变条件和轴向金属体积流动量，确定环件毛坯的形状尺寸以及轧制变形程度。合理的环件毛坯可以使环件轧制变形获得要求的截面轮廓和几何尺寸的环件锻件。从环件毛坯到环件锻件的轧制变形过程中，环件的形状尺寸是逐步变化的，也就是说在环件轧制的每一个瞬时，环件的形状尺寸是不同的。若将不同轧制时刻的环件看作毛坯，则不同形状尺寸的环件毛坯可以轧制成形为同一个环件锻件。实际上，可以按不同轧制时刻的环件来制造毛坯，这样可以得到



多个不同形状尺寸的环件毛坯，它们都可以轧制成形为同一个环件锻件。所以，合理的环件毛坯有多个，它们的形状尺寸不同、轧制变形程度不同、初始体积分配不同，但都遵从体积不变条件和轧制变形金属流动规律，都能轧制成形为同一个环件锻件。

2）环件毛坯设计方法。在径—轴向环件轧制中，通过径向轧辊和轴向轧辊的共同作用，可以使简单的矩形截面环件毛坯轧制成形为复杂截面的环件锻件。所以环件毛坯设计主要是为径向环件轧制确定合理的环件毛坯。在复杂截面环件径向轧制中，通常采用封闭孔型，轧制中环件轴向尺寸基本不变。基于径向环件轧制特点和环件毛坯设计原理，矩形截面环件和台阶截面环件毛坯设计方法如下。

① 矩形截面环件毛坯设计方法和步骤。记 B_0、d_0、D_0 分别为矩形截面环件毛坯的轴向尺寸、内孔直径和外圆直径，B、d、D 分别为环件锻件的轴向尺寸、内孔直径和外圆直径，K 为轧比，则矩形截面环件毛坯按下式设计。

$$B_0 = B,\ d_0 = \frac{d}{K},\ D_0 = \sqrt{D^2 - d^2 + d_0^2} \qquad (5.4\text{-}58)$$

矩形截面环件轧比 $K = 1.5 \sim 5$。当环件锻件外径大时，K 取大值；而环件锻件外径小时，K 取小值。在轴承环轧制时，若采用内、外座圈合锻的塔形工艺制造环件毛坯，则由于受内圈尺寸限制，外圈环件毛坯的孔径不能太小，这种情况下轧比 K 值可取小于 1.5。

② 内台阶环件毛坯设计方法和步骤。内台阶环件毛坯和锻件的尺寸标注参见图 5.4-25。在给定环件锻件尺寸和轧比的条件下，按如下方法和步骤设计内台阶环件毛坯。

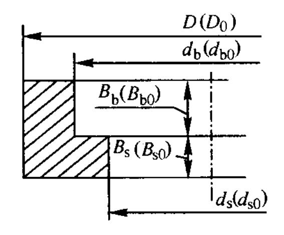


图 5.4-25 内台阶环件锻件和毛坯（括号内为毛坯尺寸）

a）根据锻件轴向尺寸确定毛坯轴向尺寸

$$B_{b0} = B_b,\ B_{s0} = B_s \qquad (5.4\text{-}59)$$

b）根据轧比 K 和锻件大孔直径确定毛坯大孔直径

$$d_{b0} = \frac{d_b}{K} \qquad (5.4\text{-}60)$$

c）按锻件内孔台阶尺寸初选毛坯小孔直径

$$d_{s01} = d_{b0} - (d_b - d_s) \qquad (5.4\text{-}61)$$

d）按体积不变条件初选毛坯外径 D_{01}

$$D_{01} = \sqrt{\frac{(D^2 - d_b^2 + d_{b0}^2)B_b + (D^2 - d_s^2 + d_{s01}^2)B_s}{B_b + B_s}} \qquad (5.4\text{-}62)$$

e）确定毛坯小孔直径

$$d_{s0} = d_{s01} + 2\psi\Delta H_{b2} \qquad (5.4\text{-}63)$$

式中，ψ 为修正系数，其值为 $\psi = 1 \sim 2$；ΔH_{b2} 为内台阶环件大孔部分在轧制中的内表面进给量，其值按下式计算

$$\Delta H_{b2} = \frac{\frac{1}{R_2} - \frac{1}{r_m}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_m} - \frac{1}{r_m}}\left(\frac{D_{01} - d_{b0}}{2} - \frac{D - d_b}{2}\right) \qquad (5.4\text{-}64)$$

式中，R_1、R_2 分别为驱动辊工作面半径和环件大孔部分对应的芯辊工作面半径；R_m 为内台阶环件锻件和毛坯外半径平均值，且 $R_m = (D_{01} + D)/4$；r_m 为内台阶环件锻件和毛坯大孔半径平均值，且 $r_m = (d_{b0} + d_b)/4$。

f）确定毛坯外径。用 d_{s0} 代替 d_{s01}，D_0 代替 D_{01} 代入式（5.4-62）计算即可确定内台阶环件毛坯的外径 D_0。

③ 外台阶环件毛坯设计方法和步骤。外台阶环件毛坯和锻件尺寸标注见图 5.4-26，其毛坯设计方法和步骤如下。

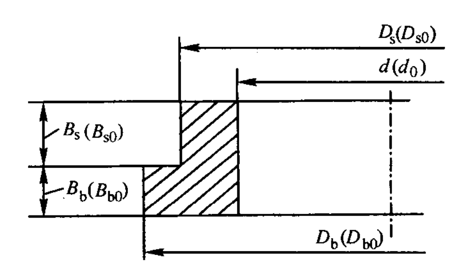


图 5.4-26 外台阶环件锻件和毛坯（括号内为毛坯尺寸）

a）根据锻件轴向尺寸确定毛坯轴向尺寸

$$B_{b0} = B_b,\ B_{s0} = B_s \qquad (5.4\text{-}65)$$

式中，B_b、B_{b0} 分别为外台阶环件锻件和毛坯大环部分的轴向尺寸；B_s、B_{s0} 分别为外台阶环件锻件和毛坯小环部分的轴向尺寸。

b）按轧比 K 确定毛坯内孔直径

$$d_0 = \frac{d}{K} \qquad (5.4\text{-}66)$$

c）按体积不变条件初选毛坯大环和小环的外径

$$D_{b01} = \sqrt{D_b^2 - d^2 + d_0^2},\ D_{s01} = \sqrt{D_s^2 - d^2 + d_0^2} \qquad (5.4\text{-}67)$$

式中，D_{b01} 为毛坯大环的初选直径；D_{s01} 为毛坯小环的初选直径。

d）毛坯径向尺寸修正。

为了保持轧制稳定性和合理分配毛坯大环和小环的体积，应对外台阶环件毛坯的径向尺寸进行修正。基于轧制稳定性的要求，在轧制开始时应使驱动辊孔型与毛坯大环的外表面和小环的部分外表面接触，即使 $D_{b0} - D_{s0} = D_b - D_s$。基于外台阶环件轧制中存在大环向小环的轴向金属流动的变形规律要求，则在尺寸修正时应使大环部分增加体积，使小环部分减小体积。具体修正方法如图 5.4-27 所示，从小环部分的内孔表面减去体积 V_1，使之加到大环和小环的外表面处。为了使轧制中外台阶环件内、外表面所受轧制力的合力作用线尽可能重合，以减小它们构成的倾翻力矩，使体积 V_1 和 V_2 的截面呈三角形，体积 V_3 的截面呈矩形。由图 5.4-27 几何条件和轧制变形规律得

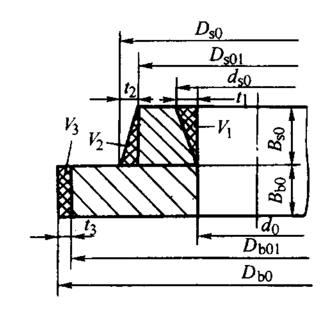


图 5.4-27 外台阶环件毛坯尺寸修正

$$t_1 = \psi\Delta H_d \qquad (5.4\text{-}68)$$

式中，ψ 为比例系数，其值为 $\psi = 1 \sim 2$；ΔH_d 为芯辊在轧制中总进给量，其值按下式计算。



$$\Delta H_d=\frac{\frac{1}{R_2}-\frac{1}{r_m}}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_m}-\frac{1}{r_m}}\left(\frac{D_{b01}-d_0}{2}-\frac{D_b-d}{2}\right) \quad (5.4\text{-}69)$$

式中，R_1、R_2 为与大环部分对应的驱动辊和芯辊工作表面半径；R_m 为外台阶环件锻件和毛坯大环部分的外半径平均值，$R_m=(D_b+D_{b01})/4$；r_m 为外台阶环件锻件和毛坯大环部分的内半径平均值，$r_m=(d+d_0)/4$。

$$t_2=\frac{-B_{b0}D_{b01}(D_s-D_s-D_{b01}+D_{s01})+B_{s0}d_0t_1}{2B_{b0}D_{b01}+B_{s0}D_{s01}} \quad (5.4\text{-}70)$$

$$t_3=\frac{\frac{1}{2}B_{s0}D_{s01}(D_b-D_s-D_{b01}+D_{s01})+B_{s0}d_0t_1}{2B_{b0}D_{b01}+B_{s0}D_{s01}} \quad (5.4\text{-}71)$$

于是得修正后的外台阶环件毛坯径向尺寸为

$$\begin{cases}D_{b0}=D_{b01}+2t_3\\ D_{s0}=D_{s01}+2t_2\\ d_{s0}=d_0+2t_1\end{cases} \quad (5.4\text{-}72)$$

(3) 典型环件毛坯设计举例

1) 矩形截面环件毛坯设计。某轴承套圈环件锻件如图5.4-28所示，尺寸单位为毫米。该环件锻件为近矩形截面环件，其轧制用环件毛坯按矩形截面环件毛坯设计。选取环件轧比 $K=2$，根据式 (5.4-58) 计算得

$$B_0=B=30\text{ mm}$$

$$d_0=\frac{d}{K}=\frac{60}{2}\text{ mm}=30\text{ mm}$$

$$D_0=\sqrt{D^2-d^2+d_0^2}=\sqrt{70^2-60^2+30^2}\text{ mm}=46.9\text{ mm}$$

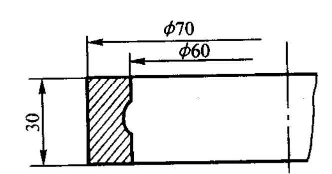


图5.4-28 近矩形截面环件锻件

2) 内台阶环件毛坯设计。参见图5.4-25，内台阶环件锻件尺寸为 $D=190$ mm，$d_b=140$ mm，$d_s=114$ mm，$B_b=16$ mm，$B_s=11.5$ mm。驱动辊工作面半径 $R_1=152$ mm，芯辊与大孔部分对应的工作面半径 $R_2=36$ mm。按照内台阶环件毛坯的设计方法得该环件锻件的轧制用毛坯尺寸如下。

① 环件毛坯的轴向尺寸

$$B_b=B_{b0}=16\text{ mm},\quad B_s=B_{s0}=11.5\text{ mm}$$

② 环件毛坯的大孔直径

$$d_0=\frac{d_b}{K}=\frac{140}{1.8}\text{ mm}=77.8\text{ mm}$$

③ 初选毛坯小孔直径

$$d_{s01}=d_{b0}-(d_b-d_s)=77.8\text{ mm}-(140-114)\text{mm}=51.8\text{ mm}$$

④ 初选毛坯外径

$$D_{01}=\sqrt{\frac{(D^2-d_b^2+d_{b0}^2)\ B_b+\ (D^2-d_s^2+d_{s01}^2)\ B_s}{B_b+B_s}}$$

$$=\sqrt{\frac{(190^2-141^2+77.8^2)\times16+(190^2-114^2+51.8^2)\times11.5}{16+11.5}}$$

$$=154.6\text{ mm}$$

⑤ 修正确定毛坯小孔直径

$$R_m=\frac{D_{01}+D}{4}=\frac{154.6+190}{4}\text{ mm}=86.2\text{ mm}$$

$$r_m=\frac{d_{b0}+d_b}{4}=\frac{77.8+140}{4}\text{ mm}=54.5\text{ mm}$$

$$\Delta H_{b2}=\frac{\frac{1}{R_2}-\frac{1}{r_m}}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_m}-\frac{1}{r_m}}\left(\frac{D_{01}-d_{b0}}{2}-\frac{D-d_b}{2}\right)$$

$$=\frac{\frac{1}{36}-\frac{1}{54.5}}{\frac{1}{152}+\frac{1}{36}+\frac{1}{86.2}-\frac{1}{54.5}}\left(\frac{154.6-77.8}{2}-\frac{190-140}{2}\right)\text{mm}$$

$$=4.6\text{ mm}$$

$d_{s0}=d_{s01}+2\psi\Delta H_{b2}=51.8+2\times1\times4.6\text{ mm}=61.0\text{ mm}$（这里取修正系数 $\psi=1$）

⑥ 确定毛坯外径

$$D_0=\sqrt{\frac{(D^2-d_b^2+d_{b0}^2)B_b+(D^2-d_s^2+d_{s0}^2)B_s}{B_b+B_s}}$$

$$=\sqrt{\frac{(190^2-140^2+77.8^2)\times16+(190^2-114^2+61.0^2)\times11.5}{16+11.5}}$$

$$=156.0\text{ mm}$$

3) 外台阶环件毛坯设计　外台阶环件锻件如图5.4-29a) 所示，尺寸单位为毫米。已知芯辊工作半径 $R_2=40$ mm，驱动辊与大环外表面对应的工作半径 $R_1=400$ mm，并给定轧比 $K=1.81$。在此条件下按外台阶环件毛坯设计方法得该环件锻件的轧制用毛坯尺寸如下。

① 环件毛坯的轴向尺寸

$$B_b=B_{b0}=24\text{ mm},\quad B_s=B_{s0}=56\text{ mm}$$

② 环件毛坯孔径

$$d_0=\frac{d_b}{K}=\frac{232}{1.81}\text{ mm}=128\text{ mm}$$

③ 初选毛坯大环和小环外径

$$D_{b01}=\sqrt{D_b^2-d^2+d_0^2}=\sqrt{340^2-232^2+128^2}\text{ mm}=280\text{ mm}$$

$$D_{s01}=\sqrt{D_s^2-d^2+d_0^2}=\sqrt{280^2-232^2+128^2}\text{ mm}=202\text{ mm}$$

④ 修正确定毛坯径向尺寸

$$r_m=\frac{d+d_0}{4}=\frac{232+128}{4}\text{ mm}=90\text{ mm},\quad R_m=\frac{D_b+D_{b01}}{4}$$

$$=\frac{340+280}{4}\text{ mm}=155\text{ mm}$$

$$\Delta H_d=\frac{\frac{1}{R_2}-\frac{1}{r_m}}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_m}-\frac{1}{r_m}}\left(\frac{D_{b01}-d_0}{2}-\frac{D_b-d}{2}\right)$$

$$=\frac{\frac{1}{40}-\frac{1}{90}}{\frac{1}{400}+\frac{1}{40}+\frac{1}{155}-\frac{1}{90}}\left(\frac{280-128}{2}-\frac{340-232}{2}\right)\text{mm}$$

$$=13\text{ mm}$$

$t_1=\psi\Delta H_d=1.5\times13\text{ mm}=20\text{ mm}$（取 $\psi=1.5$）

$$t_2=\frac{-B_{b0}D_{b01}(D_b-D_s-D_{b01}+D_{s01})+B_{s0}d_0t_1}{2B_{b0}D_{b01}+B_{s0}D_{s01}}$$

$$=\frac{-24\times280\times(340-280-280+202)+56\times128\times20}{2\times24\times280+56\times202}\text{ mm}$$

$$=11\text{ mm}$$

$$t_3=\frac{\frac{1}{2}B_{s0}D_{s01}(D_b-D_s-D_{b01}+D_{s01})+B_{s0}d_0t_1}{2B_{b0}D_{b01}+B_{s0}D_{s01}}$$

$$=\frac{\frac{1}{2}\times56\times202(340-280-280+202)+56\times128\times20}{2\times24\times280+56\times202}\text{ mm}$$

$$=2\text{ mm}$$

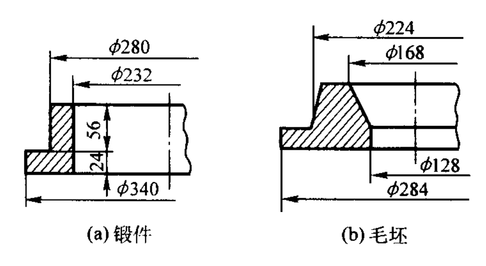
$$D_{b0}=D_{b01}+2t_3=280+2\times2\text{ mm}=284\text{ mm}$$

$$D_{s0}=D_{s01}+2t_2=202+2\times11\text{ mm}=224\text{ mm}$$

$$d_{s0}=d_0+2t_1=128+2\times20\text{ mm}=168\text{ mm}$$



以上设计的外台阶环件毛坯形状尺寸如图 5.4-29b 所示。



(a) 锻件　(b) 毛坯

图 5.4-29　外台阶环件锻件和毛坯

4.4　环件轧制模具设计和调试

环件轧制模具通常称为轧制孔型，由驱动辊与芯辊构成，它决定了轧制环件的截面轮廓形状，其设计依据为环件锻件的热锻件图。除了驱动辊和芯辊外，环件轧制工具还有导向辊或推力辊、信号辊、托料板等。本节介绍环件轧制孔型及其他轧制工具的设计和安装调试。

(1) 轧制孔型分类

按照轧制中环件与孔型的关系，轧制孔型可分为开式孔型、半开式孔型（半闭式孔型）和闭式孔型。按轧辊的结构特点，轧制孔型可分为整体式轧辊孔型和组合式轧辊孔型。以下介绍各种孔型的特点。

1) 开式孔型。开式孔型如图 5.4-30 所示，孔型无侧壁，轧制中环件的两个端面无孔型约束而处于自由状态。开式孔型由圆柱形的驱动辊与芯辊构成，孔型轧辊加工方便，使用寿命长，多用于简单的矩形截面环件轧制成形。开式孔型轧制的环件端面质量较差，截面成形能力较差，不适于轧制成形复杂截面环件。

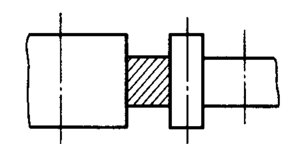
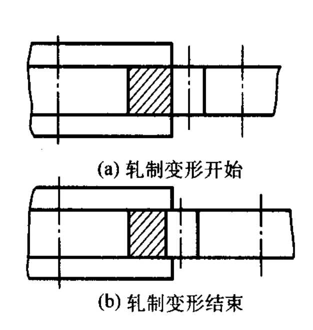


图 5.4-30　开式环件轧制孔型

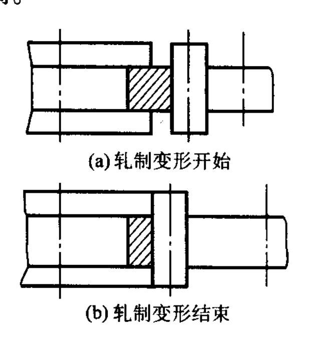
2) 闭式孔型。如图 5.4-31 所示，孔型有侧壁，轧制中环件整个截面轮廓封闭在孔型内部，环件端面轴向宽展变形受到孔型侧壁约束，因而截面轮廓容易成形充满，且端面质量好，适于轧制成形台阶截面类环件等复杂环件。闭式孔型通常用圆柱形芯辊和带侧壁的驱动辊构成，或者说孔型型槽加工在驱动辊上。由于要加工型槽，驱动辊径向尺寸要增大，机械加工不方便，特别是驱动辊型槽热处理变形不易控制。而且，闭式孔型驱动辊侧壁在轧制中受到了较大轴向张力，严重影响了驱动辊的使用寿命。此外，闭式孔型轧制的散热条件差，容易使热容量低的芯辊回火软化。


(a) 轧制变形开始

(b) 轧制变形结束

图 5.4-31　环件闭式轧制孔型

3) 半开式孔型。如图 5.4-32 所示，孔型有侧壁，但侧壁径向尺寸较小，使得在环件轧制开始阶段，仅仅环件的部分端面轴向变形受到孔型侧壁约束，只是到了环件轧制变形结束阶段，环件的整个端面轴向变形才受到孔型侧壁约束，亦即在轧制变形结束阶段环件的整个截面才受到轧制孔型的完全封闭。半开式孔型是介于开式孔型与闭式孔型之间的一种过渡孔型，它也称为半闭式孔型。半开式孔型减小了驱动辊型槽侧壁的径向尺寸，改善了孔型在轧制中的受力条件，提高了使用寿命。此外，半开式孔型的驱动辊与芯辊之间的最大缝隙（沿进给方向）大于相应闭式孔型的最大缝隙，有利于环件毛坯轧制前放入孔型，这对于轧辊中心距不大的 D51 型扩孔机轧制成形壁厚较大的环件是必需的。还有，半开式孔型的芯辊轴颈径向尺寸可以比闭式孔型的大，这有利于提高芯辊的强度和使用寿命。半开式孔型可以用于轧制成形截面形状较复杂的环件，但环件端面质量不如闭式孔型的。若半开式孔型的型槽分别刻在驱动辊和芯辊上，则轧制成形的环件锻件端面会出现毛刺。半开式孔型轧制对于环件毛坯的形状尺寸较敏感，对于环件毛坯的设计制造和轧制过程控制要求较高。


(a) 轧制变形开始

(b) 轧制变形结束

图 5.4-32　环件半开式轧制孔型

4) 整体式轧辊孔型。由整体式驱动辊和整体式芯辊构成，其尺寸精度较高，结构紧凑，装配简单，适于轧制成形截面形状不太复杂的环件锻件。整体式轧辊孔型的驱动辊要用大的模块加工制造，热处理变形较大，而且磨损后不易维修。整体式轧辊孔型多用于截面形状简单的小尺寸环件轧制成形。

5) 组合式轧辊孔型。这种孔型的轧辊是由多个零件组合装配而成的，它加工简单，维修更换方便，通过更换少量零件可以轧制成形不同截面尺寸的环件锻件，具有一定的通用性。组合式轧辊孔型通常用于大型、复杂截面环件轧制成形。图 5.4-33 为 ϕ500 卧式轧环机组合式轧辊孔型，它由整体式芯辊和组合式驱动辊构成。驱动辊的主要零件有压盖、底盖和中间环，只要更换中间环 4 就可改变型槽宽度和深度，从而轧制成形不同规格尺寸截面的环件。

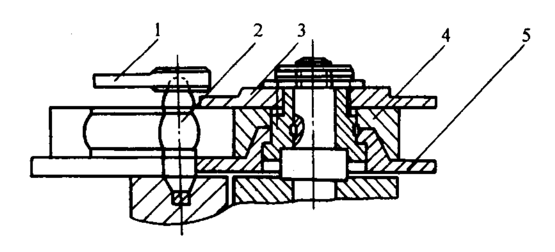


图 5.4-33　ϕ500 卧式轧环机组合式轧辊孔型

1—摇臂；2—芯辊；3—压盖；4—中间环；5—底盖

图 5.4-34 为 ϕ300 轧环机组合式芯辊，它由辊轴、平键、辊型、压紧螺栓等组合而成。要轧制成形不同内孔形状的环件，仅需要换辊型 3 即可。

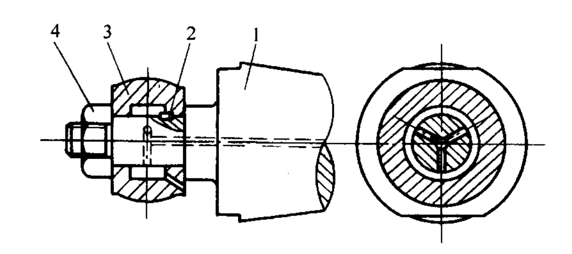


图 5.4-34 φ300 轧环机组合式芯辊

1—辊轴；2—平键；3—辊型；4—压紧螺栓

(2) 轧制孔型设计

轧制孔型设计包括结构设计和几何尺寸设计以及材料选择和力学物理性能确定等。设计中在满足孔型截面形状尺寸等于热态环件锻件截面形状尺寸的前提下，还要综合考虑轧环机结构特点、安装要求、加工和维修方便等各方面因素。

1) 驱动辊。驱动辊结构形式如图 5.4-35 所示，图 a 为常用结构，图 b、c、d 为改进结构。其中 b、c 可以调节轧制环件的轴向尺寸，图 d 改变了驱动辊的安装定位形式。驱动辊材料通常为 5CrMnMo、5CrNiM、GCr15SiMn，也有用 45 铸钢，其热处理硬度为 45 ~ 50HRC，基本结构尺寸如表 5.4-2 所示。

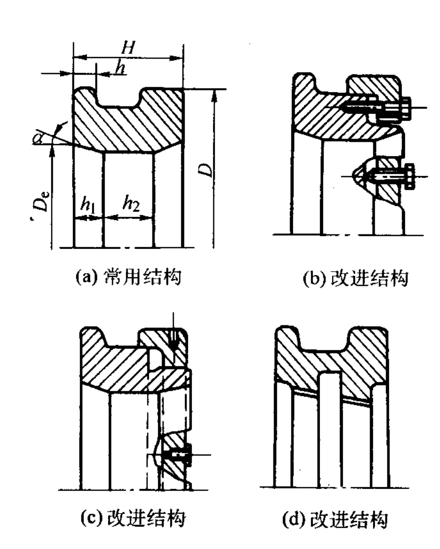


图 5.4-35 驱动辊结构形式

表 5.4-2 驱动辊结构尺寸 mm

轧环机规格	D	D_e	H	h	α	h_1	h_2
φ160	360	280	85	≥12	15°		
φ250	450/420	329	100	≥16	15°	26	48
φ350	690	500	180	$25^{+0.5}$	15° ± 5′	55	70

2) 芯辊。芯辊结构形式如图 5.4-36 所示，可分为细颈式和圆柱式两种。芯辊的结构和安装尺寸分别如图 5.4-37 和表 5.4-3 所示。芯辊材料通常为 3Cr2W8V、5CrMnMo、5CrNiMo，热处理硬度通常为 43 ~ 48HRC。芯辊在轧制工作中受力情况类似于悬臂梁，加之其径向尺寸又较小，设计中应进行强度校核。

3) 轧辊中心距校核。已设计完成的驱动辊和芯辊就构成了轧制孔型，它们的中心距或轧辊的开度和闭合情况应进行校核。轧环机的结构要求有一个最大轧辊中心距和一个最小轧辊中心距，这两者之差为轧环机压力辊进给运动行程。在最大中心距时，驱动辊与芯辊之间的开度（缝隙）为环件毛坯放入孔型的操作空间，它必须大于环件毛坯的厚度。在驱动辊与芯辊完全闭合或孔型的径向高度等于环件锻件壁厚时，两辊的中心距不得小于轧环机的最小中心距。

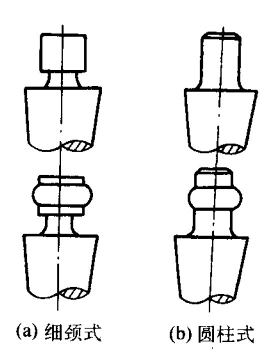


图 5.4-36 芯辊结构形式

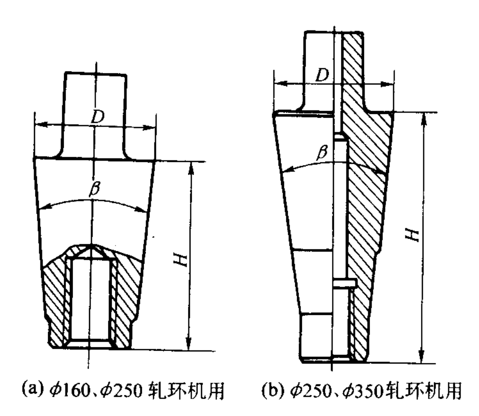


图 5.4-37 芯辊结构和尺寸

表 5.4-3 芯辊结构尺寸 mm

轧环机规格	D	β	H
φ160	70/55	8°/（10°）	125/80
φ250	75/60	8°	145/90
φ350	130	8°	355

(3) 其他轧制工具设计

除了驱动辊和芯辊外，其他轧制工具还有导向辊（推力辊）、信号辊和托料板，如图 5.4-38 所示。以下介绍它们的设计要点。

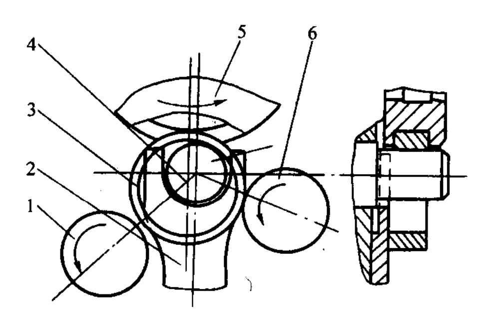


图 5.4-38 环件轧制工具

1—信号辊；2—托料板；3—环件；4—芯辊；5—驱动辊；6—导向轴

1) 导向辊和信号辊。导向辊和信号辊工作表面与环件外表面相匹配。除了轧制成形具有非圆柱面的外轮廓环件外，其他导向辊和信号辊工作表面都为圆柱面，其结构形式如图 5.4-39 所示。它们的主要结构尺寸由轧环机控制系统结构、最大环件锻件轴向尺寸及外径尺寸决定。导向辊和信

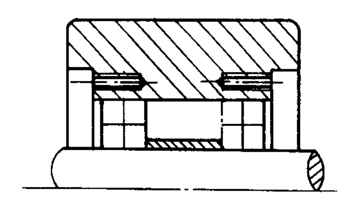


图 5.4-39 通用导向辊和信号辊的结构形式

号辊材料通常为 GCr15、5CrMnMo，其处理硬度为 44～50HRC。

2）托料板。托料板形状结构如图 5.4-40 所示，其主要尺寸有内廓半径 R 和叉口高度 y，它们按下式计算

$$R=\frac{d}{2}+(1.5\sim3)\mathrm{mm}$$

$$y=\frac{2}{3}d$$

式中，d 为芯辊工作直径。

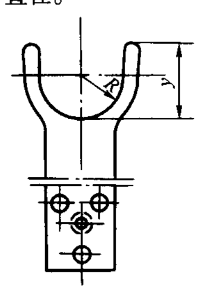


图 5.4-40 轧环机托料板

(4) 轧制孔型安装调试

轧辊设计制造完成后，要进行正确的安装和调试。只有安装调试好轧制孔型和导向辊、信号辊、托料板，才可能轧制成形合格的环件锻件。目前，轧制孔型安装调试还缺乏理论指导，主要依靠经验的总结和积累。以下介绍轧制孔型安装调试的基本要求。

1）驱动辊。驱动辊提供旋转轧制运动。对于 D51 型扩孔机，其驱动辊除了提供旋转轧制运动外，还提供直线进给运动，因而对轧制环件的质量影响较大。鉴此，驱动辊的安装调试应特别予以重视，具体要求如下。

① 驱动辊空转平稳，轴向跳动应控制在 0.1～0.2 mm 以内。

② 驱动辊在下死点时，其近轧环机侧的外圆面与芯辊的径向间隙应为 0.5 mm 以上。

③ 驱动辊的轴线应与芯辊轴线平行。

2）芯辊与托料板。芯辊的工作表面应位于驱动辊型槽中间，这可通过芯辊的轴向移位来实现。托料板与芯辊之间的径向间隙应均匀，与驱动辊型槽侧壁的外圆面之间的径向间隙也应均匀。托料板与锻件的接触平面应平整，且向后仰 1°～2°。托料板叉口靠导向辊的一边应略低于靠信号辊的一边。

3）信号辊与导向辊的位置。信号辊与导向辊的位置用标准环件来调整。标准环件是一个外径和内径分别等于热锻件图外径和内径的环件，它通常是钢板制造的。具体的调整方法有如下两种。

① 接触点法。参见图 5.4-41，标准环件套在芯辊上后，将驱动辊缓慢压下，调整导向辊位置，使标准环件与芯辊接触点 K_1 位于芯辊垂直中心线之右侧，标准环件与导向辊接触点 K_2 位于标准环件水平中心线之下侧。这时标准环件垂直中心线左移，与芯辊垂直中心线有一偏移量 B。一般情况下，环件锻件直径大时，B 值大些；而环件锻件直径小时，则 B 值小些。环件壁厚大时，B 值大些；而环件壁厚小时，则 B 值小些。轧制轻系列或特轻系列轴承套圈时，由于其壁厚小、宽度小，容易出现椭圆，应将接触点 K_2 向上调整。在轧制尺寸较小锻件时，如因驱动辊与导向辊相碰，且改变导向辊支架角度后仍无法实现上述调整要求，试轧制的环件质量又不好，则需要换外径较小的导向辊后再进行调整。

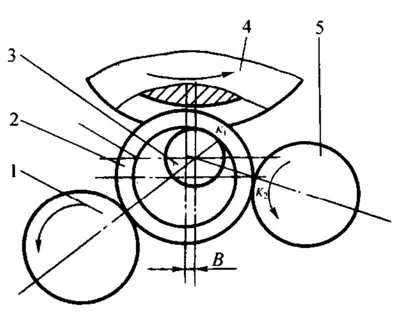


图 5.4-41 信号辊与导向辊位置调整（接触点法）
1—信号辊；2—标准环件；3—芯辊；4—驱动辊；5—导向辊

② 接触角法。参见图 5.4-42，信号辊与导向辊位置的第二种调整方法为接触角法。合理的位置是，芯辊和导向辊中心线与轧环机中心线的夹角为 60°～70°，芯辊与信号辊的中心线与轧环机中心线的夹角为 50°～60°。三辊之间的距离按下式选取

$$B=(1.5\sim2.5)A$$

当系数小于 1.5 时，轧制过程不平稳，特别是开始轧制时的振动较大。当系数大于 2.5 时，轧制过程进行得很快，环件容易夹扁。一般情况下，环件毛坯形状规则，加热规范稳定，操作熟练时，可取较大系数，否则取较小系数。

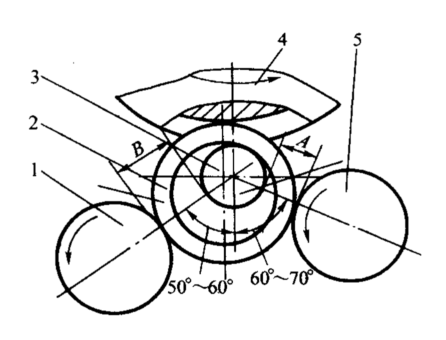


图 5.4-42 信号辊与导向辊位置调整（接触角法）
1—信号辊；2—标准环件；3—芯辊；4—驱动辊；5—导向辊

4.5 环件轧制缺陷和工艺调试

环件轧制中，由于轧制用毛坯、轧制孔型和轧制工艺参数及工艺规程等方面的原因，经常导致环件在轧制中产生各种缺陷，降低了环件质量，甚至使轧制环件报废。环件轧制变形中，金属流动规律复杂，因而其轧制缺陷也是多种多样，主要的轧制缺陷有：碟形、毛刺、凹坑、椭圆、壁厚不均、锥度、拉缩、充不满、压扁、直径不扩大等。这些轧制缺陷有时是单独出现，更多的时候是多种缺陷同时出现。

1）碟形。碟形缺陷是指环件整个端面形状呈碟形，它常出现在复杂的台阶截面环件轧制中。参见图 5.4-43 的台阶截面环件轧制中的受力情况，在图 5.4-43a 的外台阶环件轧制中，径向轧制力 P_1 和 P_2 构成逆时针力矩，孔型侧壁约束力 P_3 和 P_4 也构成了逆时针力矩的综合作用的结果使外台阶截面环件产生图 5.4-43b 所示的碟形缺陷。在图 5.4-43c 的内台阶截面环件轧制中，同样由于两个逆时针力矩的作用，最终产生图 5.4-43d 所示的碟形缺陷。防止碟形缺陷的主要措施是：①修改轧制用毛坯形状尽可能避免碟形扭

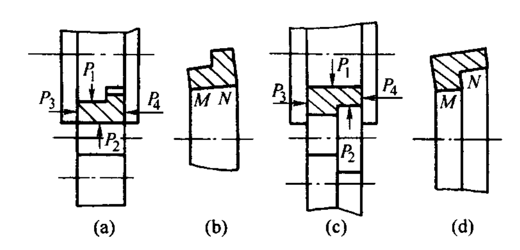


图 5.4-43 台阶截面环件轧制受力和碟形

矩；②将环件毛坯预先做成反碟形。一旦产生了碟形缺陷，则应通过校正模具对环件锻件进行热态校正。

2）毛刺。毛刺缺陷主要产生在环件两端面的内孔缘处，即图 5.4-43b、d 的环件 M、N 处。毛刺是环件轧制中最常见的缺陷，而且其产生原因较多。对于完全封闭孔型轧制，毛刺产生的主要原因有两点：一是由于轧制用毛坯轴向尺寸过大，轧制开始时毛刺挤入孔型，其端面受孔型侧壁的刮削而形成毛刺；二是驱动辊与芯辊的轴向间隙过大，轧制中轴向流动金属进入这个间隙形成毛刺。对于半封闭式孔型轧制，除了以上毛刺形成原因外，还有以下几点：一是驱动辊进给速度过小亦即每转轧制进给量过小，使轧制变形集中于环件内外表面，产生轴向金属流动而致毛刺；二是驱动辊轧制中轴向跳动过大，使环件产生一较大轴向变形或使环件端面产生刮削而致毛刺；三是托料板位置过高或过低，使环件端面产生刮削而致毛刺；四是轧制用毛坯孔缘圆角或倒角过小，不能充分容纳轴向流动金属而致毛刺。上述各种毛刺产生原因经常交互作用，使得毛刺的成因变得复杂。但只要针对以上各种原因，采取相应的措施进行调整，仍然可以有效防止毛刺的产生和长大。

3）凹坑。凹坑又称鱼尾或波浪形，产生于环件的两个端面，是环件轧制中经常出现的缺陷。其主要原因是环件壁厚与接触弧长（环件与轧辊接触面的圆周方向弧长）的比值过大，使轧制变形集中于环件内外表面，经过多转轧制累积导致环件壁厚中心附近产生周向伸长和轴向压缩，这类似于圆柱体镦粗时因高径比过大而产生双鼓形的情况。此外，轧制用毛坯端面在制坯中产生的原始凹痕对轧制凹坑的形成有较大的诱发作用。主要防止措施有三点：①增大轧制进给速度亦即使每转轧制进给量增大，轧制接触弧长增大，塑性变形区穿透环件壁厚并分布均匀，从而使环件产生较为均匀的径向壁厚压缩、切向圆周伸长的轧制变形；②适当减小轧比；③避免制坯中产生端面原始凹痕。轧制进给速度的增大受到设备轧制力和环件轧制咬入条件限制，轧比减小使环件毛坯直径增大，它受到制坯工艺限制。因此，防止环件轧制中产生端面凹坑，要综合考虑制坯能力、轧制设备能力和轧制咬入条件等因素。

4）椭圆。椭圆是指环件经轧制变形后本应为圆柱面的外表面和内表面偏离了圆柱面，使环件内、外表面出现了最大直径和最小直径。当椭圆度较大时，最大直径与最小直径的差值也较大，以致会出现平均直径合乎要求，而最大和最小直径超出规定范围。椭圆产生的原因主要有三方面：一是导向辊位置不当，导向辊对环件作用力大小不合适以及导向辊支承机构的刚性不足；二是轧制变形结束前精轧整形不足；三是环件轧制过程不平稳。防止椭圆可采取以下措施：①通过轧制试验调整好并固定导向辊位置（用于导向辊位置固定的立式轧制环机），调整好并稳定导向辊背压力（用于导向辊位置随动的卧式轧环机），同时保证导向辊支承机构具有足够的刚性；②调整设备的精轧机构，保证轧制变形结束前环件有不少于一转的精轧整形；③使轧制用毛坯壁厚均匀（制坯冲孔不偏心），轧制前毛坯加热均匀，轧制进给速度避免剧烈变化，以保证环件轧制过程平稳进行。值得注意的是，实际环件轧制中椭圆度大小并非与直径成正比，亦即常常出现环件内孔椭圆度大于环件外圆椭圆度的情况。这种情况要尽量控制轧制用毛坯冲孔偏心程度，保证轧制过程的平稳性。

5）壁厚不均。壁厚不均的主要原因有三点：一是轧制用毛坯冲孔偏心，二是毛坯加热不均匀，三是轧制中轧辊的径向跳动或进给方向振动。其中，轧制用毛坯冲孔偏心亦即环件毛坯壁厚不均和毛坯加热不均亦即毛坯变形抗力不均又会加剧轧制中轧辊在进给方向的振动。防止环件壁厚不均的主要措施有：①尽量减小环件毛坯冲孔偏心度；②毛坯均匀加热尤其是冷态环件毛坯的二次加热均匀；③消除轧制过程振动，保证轧制过程平稳。

6）锥度。锥度是指轧制变形后环件本应为圆柱面的内外表面变成了有一定锥度的圆锥面，例如在 D51－400 轧环机上轧制 EQ140 汽车差速器从动螺旋齿轮锻件（一种内台阶截面环件）时，其外圆锥面半角可达 4°～6°。锥度产生的主要原因是轧制中驱动辊与芯辊轴线不平行。此外，导致碟形的原因也会导致锥度的产生。轧制中驱动辊与芯辊轴线不平行是设备制造精度差、轧辊刚性差以及轧辊支承机构刚性差所致。消除锥度的主要措施是修改轧制孔型的形状，在轧辊孔型上加工出反向锥度以补偿轧制锥度。

7）拉缩。拉缩是轧制变形后环件台阶轴向尺寸小于轧制孔型台阶轴向尺寸的现象。拉缩的主要原因是台阶截面环件轧制变形的不均匀性，拉缩量的大小与环件台阶尺寸、轧辊尺寸、轧制变形量、轧制进给速度以及轧制温度等许多因素有关。由于台阶截面环件轧制变形不均匀是绝对的，所以拉缩现象是不可避免的。为了防止其对环件台阶轴向尺寸精度的影响，可以将轧制孔型相应处的轴向尺寸适当加大以及将轧制用毛坯台阶轴向尺寸适当加大以补偿轧制中拉缩造成的台阶轴向尺寸减小。

8）充不满。充不满是指环件台阶径向尺寸小于相应孔型台阶的径向尺寸，即轧制结束时环件台阶未能充满孔型。充不满现象有两种：一是轧制中环件台阶始终未能充满孔型；二是轧制中某一时刻台阶充满孔型后又随着轧制过程的进行台阶径向尺寸减小而与孔型分离。充不满的主要原因是轧制用毛坯形状尺寸不合理。此外，轧辊尺寸及轧制进给速度也有一定影响。其主要防止措施是修改轧制用毛坯形状尺寸。

9）压扁。压扁的原因是轧制中的进给速度过大，即每转进给量过大以致环件不能咬入孔型。不仅在环件与轧辊接触面产生较大的压坑，而且使环件产生整体形状变化即变成椭圆。压扁现象很容易产生在轧制开始阶段。对于一定的轧辊、轧制用毛坯和轧制摩擦条件，有一个确定的最大轧制进给速度与之对应。若实际轧制进给速度超过此值，则环件不能咬入孔型且产生压扁现象。其主要防止措施是减小进给速度，增大轧制摩擦系数，但进给速度不能小于环件锻透所要求的最小数值。

10）环件直径不扩大。直径不扩大是指环件连续咬入孔型进行轧制，但并不产生宏观的壁厚减小和直径扩大的塑性变形。直径不扩大的原因是轧制中的进给速度过小，以致塑性区不能穿透环件壁厚，环件无法产生整体壁厚减小和直径扩大变形，而且还在环件孔缘处产生毛刺。直径不扩大的现象容易产生于轧制开始阶段。同样，对于一定的轧辊和轧制用毛坯，有一个确定的最小轧制进给速度与之对应。若实际轧制进给速度小于此值，则环件不能锻透且直径不扩大。其主要防止措施是增大进给速度，但进给速度不能大于环件咬入所允许的最大数值。当然，进给速度的增大还会受到设备能力的制约。

5　环件轧制设备

按照环件轧制设备结构特点分类，环件轧制设备可分为立式轧环机和卧式轧环机两类。按照轧制变形特点分类，环件轧制设备可分为径向轧环机、径—轴向联合轧环机。按照环件轧制变形温度分类，环件轧制设备可分为热轧环机和精密冷轧环机。立式轧环机通常采用径向轧制变形，属于径向轧环机，适用于中小型环件轧制成形。卧式轧环机既有采用径向轧制变形的，也有采用径—轴向联合轧制变形的，适用于大型和特大型环件轧制成形。以下简述各种轧环机工作原理、结构特点和应用范围，介绍轧制生产线的组织和配置。

5.1　立式轧环机

(1) 结构形式和工作原理

立式轧环机结构形式如图5.4-44所示，它由带轮1、减速箱2、气罐3、万向节4、气缸5、活塞杆6、滑块7、驱动辊8、芯辊9、机身10等零部件组成，其传动系统如图5.4-45所示。立式轧环机工作原理为：电动机通过减速箱9、万向节3和传动轴使滑块2上的驱动辊4转动。将环件毛坯7套在芯辊5上，然后将压缩空气送入气缸1的上腔，通过活塞和活塞杆使滑块带动驱动辊向下进给，使环件毛坯连续咬入孔型产生轧制变形。当环件外径增大到预定尺寸时，环件与信号辊6接触，这时控制机构使气缸下腔进气、上腔排气，通过活塞和活塞杆使滑块带动驱动辊回程，轧制变形结束。

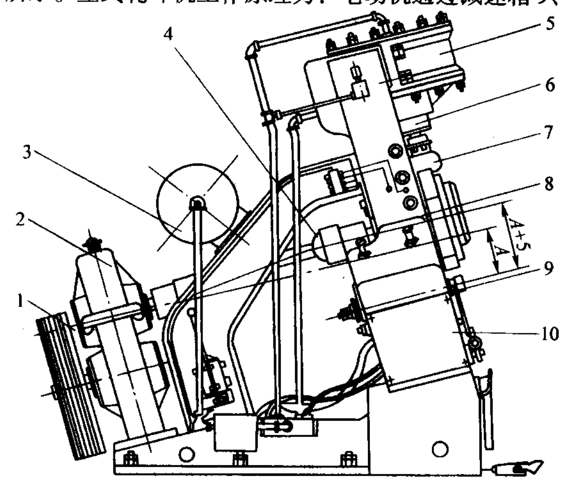


图5.4-44　立式轧环机结构形式

1—带轮；2—减速箱；3—气罐；4—万向节；5—气缸；6—活塞杆；7—滑块；8—驱动辊；9—芯辊；10—机身

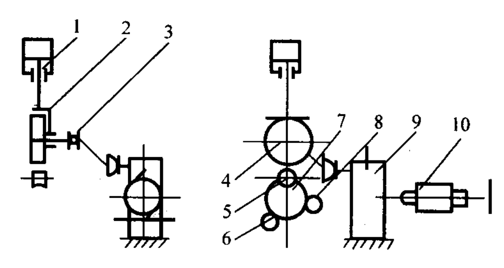


图5.4-45　立式轧环机传动系统

1—气缸；2—滑块；3—万向节；4—驱动辊；5—芯辊；6—信号辊；7—环件；8—导向辊；9—减速箱；10—电动机

(2) 主要技术参数和应用

国产立式轧环机主要技术参数如表5.4-4所示。立式轧环机结构简单，造价低廉，操作方便，广泛地用于外径ϕ400 mm以下的各种环件轧制生产尤其是轴承套圈锻件的轧制生产。立式轧环机通常采用人工上下料，轧制结束再用夹钳将环件锻件从芯辊上取下，上下料劳动强度较大。当环件毛坯较重又不容易套住芯辊时，轧制上料更为困难。而且，立式轧环机要用芯辊支承环件的重量，这对于芯辊的刚度是不利的。所以，立式轧环机不适于轧制大型环件。立式轧环机的控制系统容易在轧制氧化皮碰上信号辊时发生误动作，且信号辊刚性支承对轧制环件有撞击，影响了轧制环件几何精度。因此，一些使用立式轧环机轧制成形的工厂，常常拆除其控制系统，而用目测控制轧制环件外径，这样不利于获得较高尺寸精度的环件。立式轧环机结构紧凑，占地面积小，重量轻，投资少，生产率高，是中小型环件轧制生产的主导设备。

表5.4-4　国产立式轧环机主要技术参数

轧环机型号	D51-160	D51-160Y	D51-250	D51-350	D51-160K	D51-250K	D51-350K	D51-400
轧制环件外径/mm	45~160	45~160	250	350	45~160	250	350	400
轧制环件宽度/mm	35	35	50	85	50	85	120	100
环件材料强度极限/MPa	≤95	≤95	≤95	≤95	≤95	≤95	≤95	≤95
最大生产率/件·h^{-1}	500	500	400	200	300	240	100	120
公称轧制力/kN	50	60	98	155	113	196	310	180
滑块最大行程/mm	70	70	110	130	70	110	130	130
轧制线速度/m·s^{-1}	2~2.5	2~2.5	2.1	2.2	1.64	1.63	1.45	2
主轴转速/r·min^{-1}	120	120	80	62	92	62.3	41	
驱动辊外径/mm	360~380	360~380	500~520	680~700	360~380	500~520	680~700	680
压缩空气公称压力/MPa	0.5		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
自由空气理论消耗量/m^3·min^{-1}	0.9		1.8	1.52	1	1.6	1.4	
芯辊中心高/mm	670	670	875	1 050	670	875	1 100	
驱动辊与芯辊最小中心距/mm	185	185	265	365	185	265	365	370



续表 5.4-4

轧环机型号	D51-160	D51-160Y	D51-250	D51-350	D51-160K	D51-250K	D51-350K	D51-400
电动机功率/kW	18.5	22.5	37	75	30	55	90	75
机床外形尺寸 L/mm×W/mm×H/mm	2 200×1 550×1 850	2 200×1 550×1 850	2 890×1 900×2 400	4 050×1 800×3 000	2 350×1 700×2 100	3 440×2 000×2 700	4 595×2 000×3 370	3 670×2 650×3 100
机床总质量/kg	2 800	3 000	6 500	10 000	3 300	7 200	12 000	12 500

5.2 卧式轧环机

卧式轧环机有径向轧制卧式轧环机和径-轴向联合轧制卧式轧环机两种。

（1）结构形式和工作原理

1）径向轧制卧式轧环机。径向轧制卧式轧环机又称不带端面锥辊的卧式轧环机，其结构形式如图5.4-46所示。径向轧制卧式轧环机传动和控制机构如图5.4-47所示。参见图5.4-47，径向轧制卧式轧环机工作原理为：电动机1经联轴器2、减速箱3带动驱动辊6转动。芯辊7下端安装在滑块9上，上端安装在上下摆动的支架10上，而支架又安装在滑块上，因此，支架、芯辊可随着滑块作进给和回程运动。当芯辊向右运动时，它对环件13施以一定压力，使环件被旋转的驱动辊连续咬入轧制孔型，产生壁厚减小和直径扩大的塑性变形。当轧制变形结束时，芯辊停止向右的进给运动，并开始向左作回程运动。芯辊的运动和对环件施加的轧制压力，均由主缸11的进油情况而确定。当主缸右腔进油使滑块向左回程时，支架碰着机身4上的固定挡块12后，强制围绕连接销作反时针转动并抬起，以便于环件锻件下料和下一个环件毛坯上料。

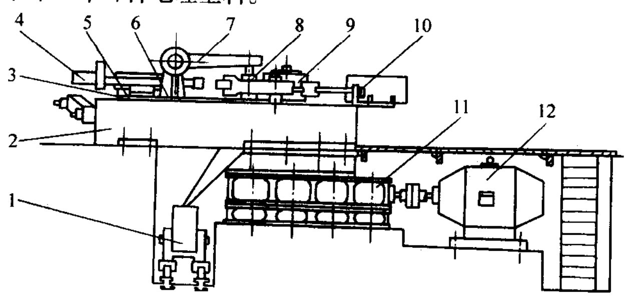


图5.4-46 径向轧制卧式轧环机

1—落料箱；2—机身；3—支架摆动机构；4—检测机构；5—主缸；6—滑块；7—支架；8—芯辊；9—驱动辊；10—导向辊机构；11—减速箱；12—电动机

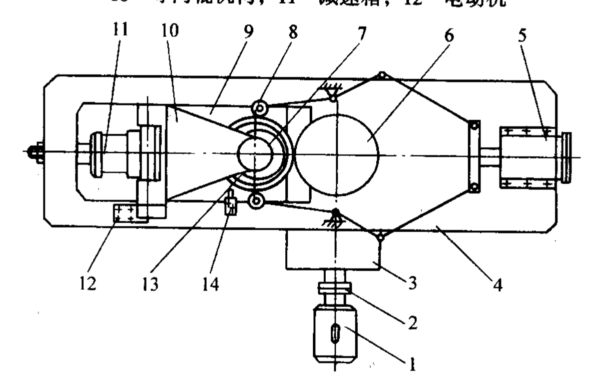


图5.4-47 径向轧制卧式轧环机传动和控制机构

1—电动机；2—联轴器；3—减速箱；4—机身；5—抱缸；6—驱动辊；7—芯辊；8—导向辊；9—滑块；10—支架；11—主缸；12—挡块；13—环件；14—检测机构

环件轧制过程由测控机构控制，环件轧制中的动态尺寸测量装置实时跟踪检测。当环件外径到位时，检测机构发出信号，使液压进给系统停止进给，芯辊和滑块回程。径向轧制卧式轧环机导向辊（又称抱辊）的运动和工作压力通过抱缸和连杆机构控制，并可通过液压系统来调整其工作参数。

2）径-轴向轧制卧式轧环机。径-轴向轧制卧式轧环机是对径向轧制卧式轧环机的改进，主要是增加了端面轴向轧制机构。端面轴向轧制机构采用一对锥辊对环件端面进行轧制，有效地提高了环件端面精度和质量。径-轴向轧制卧式轧环机结构形式如图5.4-48所示。该设备的工作原理为：电动机通过传动系统8使驱动辊7转动，液压泵通过液压系统9使芯辊5作直线进给运动。环件在驱动辊和芯辊共同作用下连续咬入孔型产生径向壁厚减小和直径扩大的径向轧制变形，同时环件又可在轴向轧制机构3的一对锥面轧辊作用下产生端面轴向轧制变形。测量机构4实时检测环件轧制中的动态尺寸，当环件外径达到规定值时，测量机构发出信号，控制机构动作，使芯辊进给运动停止、端面锥辊进给运动停止，芯辊和锥辊回程，轧制过程结束，并为下一个环件轧制作准备。

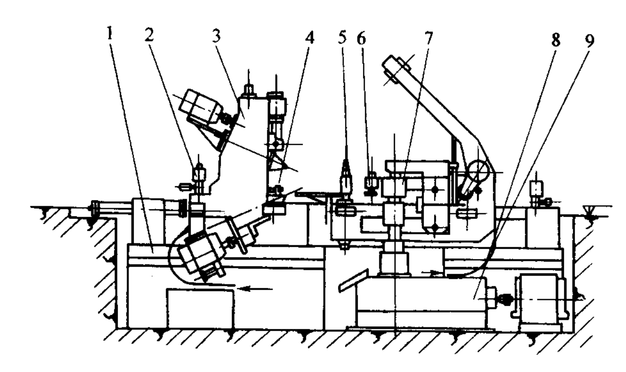


图5.4-48 径—轴向轧制卧式轧环机

1—机身；2—润滑系统；3—轴向轧制机构；4—测量机构；5—芯辊；6—定心机构；7—驱动辊；8—传动系统；9—液压系统

径—轴向轧制卧式轧环机的端面轴向轧制机构有固定式和移动式两种。其中移动式端面轴向轧制机构可在轧环机机身上水平移动，以适应不同直径的环件轧制。端面轴向轧制机构的工作方式有三种：①在环件整个径向轧制过程中，端面锥辊都进行轴向轧制。②在环件径向轧制的初期，端面锥辊进行轴向轧制，此后端面锥辊主要用来防止环件在轴向产生宽展。③在环件径向轧制的后期，端面锥辊进行轴向轧制，使环件达到规定的轴向尺寸。

（2）主要技术参数和应用

国产卧式轧环机主要技术参数如表5.4-5所示。表中D52系列为径向卧式轧环机，D53系列为径—轴向卧式轧环机。卧式轧环机主要用于外径ϕ500 mm以上的大型和特大型环件轧制成形，如火车车轮和轮箍、燃气轮机环、喷气式飞机壳体与机匣、特大型轴承套圈等。



表 5.4-5 国产卧式轧环机主要技术参数

设备型号	D52－1000	D52－1600	D53K－1600	D53K－3000	D53K－4000
环件外径/mm	350～1 000	400～1 600	400～1 600	500～3 000	500～4 000
环件高度/mm	250	300	60～300	80～500	80～700
径向轧制力/kN	800	1 000	1 250	2 000	2 000
轴向轧制力/kN	—	—	1 000	1 250	1 600
轧制速度/m·s⁻¹	1.3	1.3	1.3/0.4～1.6	1.3/0.4～1.6	1.3/0.4～1.6
径向电动机功率/kW	200	280	280	500	630
轴向电动机功率/kW	—	—	2×160	2×220	2×315

5.3 精密冷轧环机

针对轴承环精密冷轧成形技术发展需要，国内有关企业研究开发了精密冷轧环机。生产应用表明，精密冷轧成形不仅使轴承环达到精车加工精度，而且还大幅度地提高了轴承环的力学性能和使用寿命。精密冷轧环机结构形式属立式轧环机，进给机构采用机械驱动或液压驱动。目前，洛阳国投精密机械有限公司、洛阳轴承研究所等企业开发的精密冷轧环机已经批量生产。国产精密冷轧环机主要技术参数如表5.4-6所示。

表 5.4-6 国产精密冷轧环机主要技术参数

设备型号	D56G90	D56G120	D56G140	PCR－72	PCR－80	PCR－120	PCR－230
环件外径/mm	90	130	150	90	90	120	200
环件高度/mm	25	45	40	25	30	40	50
轧制力/kN	100	200	300	80	120	180	200
主轴转速/r·min⁻¹	145	120～280	121	100	130	200	200
滑块行程/mm	135	130	100				
进给速度/mm·s⁻¹	0～18	0.02～16	0.04～2.0	0～10	0～10	0～10	0～10
主电动机功率/kW	11	22	22	5.5	7.5	18.5	30
机床质量/kg	3 300	4 500	11 000	2 600	3 000	4 000	5 000
机床占地尺寸 L/mm×W/mm	1 690×1 300	1 850×1 450	2 080×1 500	1 800×1 300	1 800×1 500	1 800×1 500	2 300×1 600

6 环件轧制工艺实例

6.1 环件轧制生产线

环件轧制生产线由加热设备、制坯设备、轧制设备、整形设备等构成。其中，加热设备有：煤加热炉、油（重油、柴油）加热炉、气体（煤气、天然气）加热炉、电阻加热炉、感应加热炉、接触电加热等。制坯设备有：自由锻锤、平锻机、冲床、热模锻压力机、摩擦压力机、高速镦锻机等。轧制设备有：立式轧环机、卧式轧环机、多工位轧环机等。整形设备有：自由锻锤、摩擦压力机、液压机等。除了轧环机是专用设备外，环件轧制生产线的其他设备都为通用设备。

环件轧制生产线的设备品种规格多，性能特点各异，设备投资相差悬殊。具体选型时应综合考虑轧制环件尺寸、精度、批量，设备的力能参数、生产率、投资以及能源供应、地基要求、环境污染等多方面因素，选择技术经济性好、环境污染小的设备构成。

对于小型环件大批量生产，其轧制生产线设备构成通常为：

1）感应加热炉加热长棒料—多工位热模锻压力机制坯—多工位轧环机轧制成形—机械压力机整形；

2）感应加热炉加热长棒料—平锻机制坯—立式轧环机轧制成形—机械压力机整形；

3）感应加热炉加热棒料段—热模锻压力机制坯—立式轧环机轧制成形—机械压力机整形。

对于中小型和中型环件的批量生产，其轧制生产线设备构成通常为：

1）感应加热炉加热棒料段—热模锻压力机制坯—立式轧环机轧制成形—机械压力机整形；

2）煤炉（油炉、气体炉）加热棒料锻—自由锻锤制坯—立式轧环机轧制成形—机械压力机整形。

对于中型和中大型环件的批量生产，其轧制生产线设备构成通常为：

1）感应加热炉加热棒料段—热模锻压力机制坯—立式轧环机轧制成形—机械压力机整形；

2）煤炉（油炉、气体炉）加热棒料段—自由锻锤制坯—立式轧环机轧制成形—机械压力机整形。

对于大型环件小批量生产，其轧制生产线设备构成通常为：

1）感应加热炉加热棒料段—自由锻锤、摩擦压力机制坯—立式轧环机轧制成形—自由锻锤（摩擦压力机）整形；

2）煤炉（油炉、气体炉）加热棒料段—自由锻锤、摩擦压力机制坯—立式轧环机（卧式轧环机）轧制成形—自由锻锤（摩擦压力机）整形。

对于特大型环件小批量生产，其轧制生产线设备构成通常为：

煤炉（油炉、气体炉）加热钢锭—自由锻锤、液压机制坯—卧式轧环机轧制成形。

以上环件轧制生产线设备构成只是一些常见的情况，可以根据工厂具体条件予以调整和更改。对于整形设备，可视轧制成形的环件质量及精度要求，予以取舍。

6.2 典型环件轧制工艺流程

1）NJ130汽车发动机飞轮齿圈轧制工艺流程。该齿圈锻



件为矩形截面环件，其几何尺寸为 $D\times d\times B=\phi376$ mm × $\phi340$ mm × 16 mm，属中大型薄壁环件。轧制生产线设备与工艺流程如下：

煤炉加热—400 kg空气锤制坯—D51 - 400轧环机轧制成形（三道孔型轧制）—200 t液压机胀形整形。

2）NJ130汽车差速器从动螺旋齿轮锻件轧制工艺流程 NJ130汽车差速器从动螺旋齿轮锻件为内台阶环件，其外径 $\phi325$ mm，大孔径 $\phi228$ mm，小孔径 $\phi179$ mm，轴向高度 50 mm，属中大型厚壁异形环件。轧制生产线设备与工艺流程如下：

油炉加热—750 kg空气锤制坯—D51 - 350轧环机轧制成形—630 t摩擦压力机整形。

3）EQ140汽车差速器从动螺旋齿轮锻件轧制工艺流程。EQ140汽车差速器从动螺旋齿轮锻件为内台阶环件，其外径 $\phi382$ mm，大孔径 $\phi280$ mm，小孔径 $\phi228$ mm，轴向尺寸 55 mm，属中大型厚壁异形环件。该环件市场需求量大，生产厂家多，轧制生产线与工艺流程多样，以下介绍几种典型的轧制生产线设备与工艺流程。

工艺流程1：煤炉加热—750 kg空气锤制坯—D51 - 400轧环机轧制成形。

工艺流程2：煤炉加热—1 t空气锤制坯—D51 - 350轧环机轧制—1 000 t摩擦压力机模锻—315 t冲床冲连皮。

工艺流程3：感应电炉加热—3 t模锻锤镦粗、冲盲孔—300 t摩擦压力机冲连皮—$\phi500$ 轧环机轧制成形。

4）转盘环件轧制工艺流程 转盘环件锻件为矩形截面环件，几何尺寸为 $D\times d\times B=\phi996$ mm × $\phi770$ mm × $\phi100$ mm，属大型环件。轧制生产线设备与工艺流程如下：

油炉加热—5 t自由锻锤镦粗、冲孔、冲连皮—5 t自由锻锤马架扩孔、平端面—二次加热—D51 - 1000卧式轧环机轧制成形。

5）轴承套圈冷轧成形工艺流程 轴承套圈锻件为带沟槽的异形截面环件，外径为 $\phi100\sim200$ mm，属小型薄壁环件。轧制生产线设备与工艺流程如下：

锻造制坯—软化退火—车削精化毛坯—冷轧环机轧制成形—热处理—磨削—成品。

编写：华 林（武汉理工大学）
程培元（武汉理工大学）

第 5 章　摆 动 辗 压

1　摆辗工艺的特点、分类及应用

1.1　摆辗成形的原理

摆动辗压（以下简称摆辗）是一种先进的塑性成形工艺。自 20 世纪 60 年代摆辗出现以来，得到了世界各国的重视。由于它具有省力、节材、冲击振动小、噪声小、产品精度高、可以实现净形或近似净形成形等优点，因而，在车辆、机床、电器仪表、五金刀具等生产部门得到了迅速地发展和广泛地应用。

摆辗为连续局部成形。其原因是摆辗设备有一个特殊的摆动机构——摆头。摆头的中心线 OO' 与摆辗机机身的 Oz 存在一个夹角 γ，称为摆角，如图 5.5-1 所示。在摆辗成形过程中，摆头带动锥面上模 1 沿毛坯 2 表面连续摆动和滚动，油缸 4 不断推动滑块 3 把毛坯送进加压。整个摆辗过程中，上模和毛坯只是局部接触，局部成形。摆辗是通过连续的局部变形来实现整体的塑性变形。

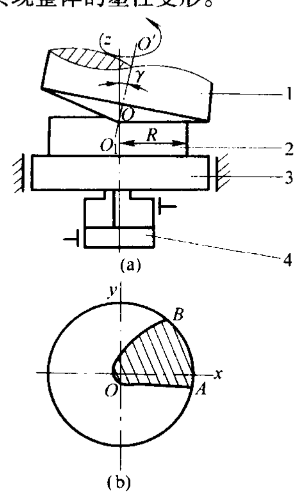


图 5.5-1　摆辗工作原理示意图
1—上模；2—毛坯；3—滑块；4—液压缸

1.2　摆辗工艺的基本特点

由于摆辗变形是连续的局部加压成形，接触面积小，每一次变形量小，因此有如下基本特点。

1）省力。塑性成形同样大小的工件，摆辗时工件所需的变形力小，因此所用设备吨位小。摆辗变形省力的情况，视工件复杂程度不同而异。摆辗变形力为一般整体塑性变形力的 1/5 ~ 1/20。

2）产品尺寸精度高。由于摆辗成形的任何一瞬时都是小力、小变形，又是静载，设备相对刚度大，所得的产品尺寸精度高，表面粗糙度值低。冷摆辗工件垂直尺寸精度可达 0.025 mm，粗糙度可达 R_a0.4 ~ 0.8 μm。

3）适合薄盘类零件的成形。摆辗特别适合压制薄盘、圆饼、法兰、半轴类和勾销等零件。生产薄盘类零件，用普通设备进行整体锻造成形时，因摩擦力和毛坯高径比的影响，使所需的单位成形力可能超过模具材料的强度极限，而造成无法成形。塑性成形时摩擦力的大小取决于模具与毛坯之间的润滑状态及相对运动情况。采用摆辗方法时，模具与毛坯间的接触面积小，模具与毛坯表面间的摩擦可能由滑动摩擦变为滚动摩擦，摩擦系数大大降低。日本学者测定的摩擦系数结果为：无润滑时为 0.30，有润滑时为 0.06；我国学者的测定结果为：无润滑时约 0.35，用机油润滑为 0.084，用硅油加石墨润滑时为 0.031。普通设备锻造时，有润滑状态及无润滑状态为 0.15 ~ 0.30。同时也由于摆辗时模具与毛坯间的接触面积小，相对高径比大，毛坯易屈服产生塑性变形，所需单位压力和载荷小。图 5.5-2 为英国学者 1966 年在试验机上进行的铅件辗压所需的轴向力的比较。从图中可以看出，摆辗变形力比一般锻造小得多，且工件越薄越显著。用摆辗法能辗压成形高径比 H/D 很小，而一般锻造不能成形的工件，扩大了锻造产品的范围。

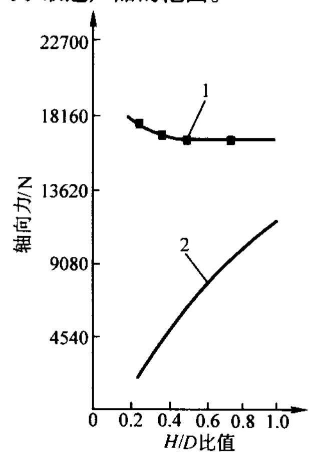


图 5.5-2　普通镦锻和摆辗轴向力比较
1—普通镦锻；2—摆辗

4）工况好。无振动，噪声低，易实现机械化、自动化，劳动强度低，劳动环境好。

5）设备小，占地面积小。

6）生产效率高。

摆辗作为一种塑性成形方式除了有以上优点外，还有如下缺点。

1）通常需要制坯。摆辗成形是经多次累积小变形使毛坯达到整体成形的。同时，摆辗时毛坯始终受偏心载荷作用，所以毛坯高经比 H_0/D_0 不能太大，否则效率低，工艺稳定性差。

2）机器结构复杂。摆辗机要实现复杂的摆动运动，机器始终在偏载中工作，机器刚度要求高，所以摆辗机比普通锻造机器紧凑、复杂。

1.3　圆柱形件摆辗变形的基本规律

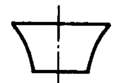
摆辗过程中，上模与毛坯是局部接触的。毛坯与模具接触部分在模具压力作用下产生塑性变形，这一部分称为主动变形区，非接触部分称为被动变形区。

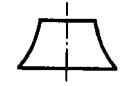
圆柱形毛坯是摆辗工艺毛坯的基本形式，其变形情况与进给量大小（或辗压力的大小）、毛坯高径比（H_0/D_0）和润滑状态有很大关系。通常把 $H_0/D_0 > 0.5$ 称为厚件，把 $H_0/D_0 \leqslant 0.5$ 称为薄件。圆柱形件摆辗件有如下规律。

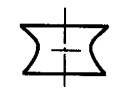
1）厚件易产生“蘑菇效应”。摆辗变形时，因毛坯受偏心载荷作用，较普通镦粗时允许的高径比小，易发生纵向弯



曲。根据不同的变形条件，圆柱形毛坯的变形情况如图 5.5-3 和表 5.5-1。


(a) 蘑菇头形


(b) 倒蘑菇头形


(c) 滑轮形状

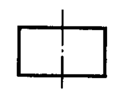

(d) 均匀变形

图 5.5-3 圆柱形件摆辗外形情况

表 5.5-1 摆辗件变形情况

序号	工件变形后名称	变 形 条 件
A	蘑菇头形	$H_0/D_0>0.5$，γ 一定，S 较小，ε 一定，工件上端面摩擦系数较小
B	倒蘑菇头形	$H_0/D_0>0.5$，γ 一定，S 较大，ε 一定，工件上端面摩擦系数较大，且与工件粘结，工件下端面先发生变形
C	滑轮形状	$H_0/D_0>0.5$，γ 一定，S 稍大，ε 较大，两端面同时发生变形，工件呈滑轮状，继续变形易产生折叠
D	均匀变形	$H_0/D_0\leqslant 0.5$，γ、S 和 ε 一定，工件侧壁呈直线，工件形状平直

注：H_0，D_0—工件原始高度及直径；γ—摆角；S—每转进给量；ε—相对变形程度。

2）上下接触面上压力分布不同。圆柱件摆辗变形时，上、下接触面上的单位压力分布是不均匀的，而且上模各点的轴向单位压力一般均大于下模工件上对应点的轴向单位压力；边缘部分、工件很薄和发生翘曲时，则上、下模各对应点轴向单位压力逐渐趋于相等；最大单位压力点出现在约 $0.25r_0$（r_0—工件的半径）处；上模单位压力较高（图 5.5-4）。

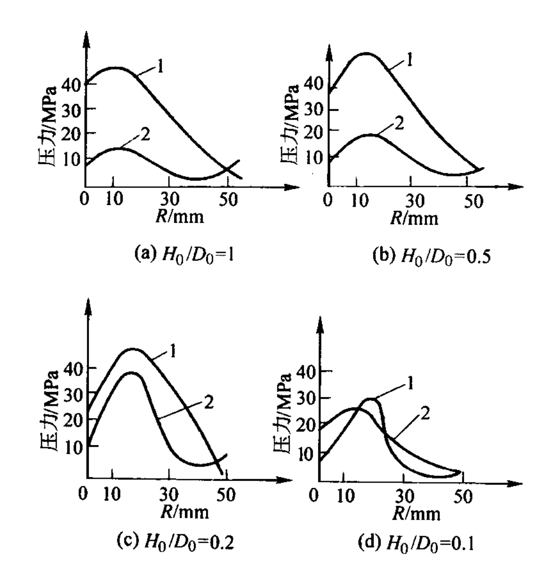


图 5.5-4 上、下接面单位压力分布曲线

毛坯原始直径 D_0 = 110 mm 铝材

相对变形程度 ε = 2% ~ 18.5%

1—上模；2—下模

1977 年英国学者用电测法测量了 ϕ48 mm × 6 mm 铝材试件下端面与下模具接触处压力的分布（图 5.5-5），其结果为：工件中心压力数值约是屈服应力的 1/4，向外逐渐增大，最大压力点处于工件的 $0.6r_0$ 处，其值等于屈服应力的 3 倍，之后逐渐减少，到外缘处约等于屈服应力。

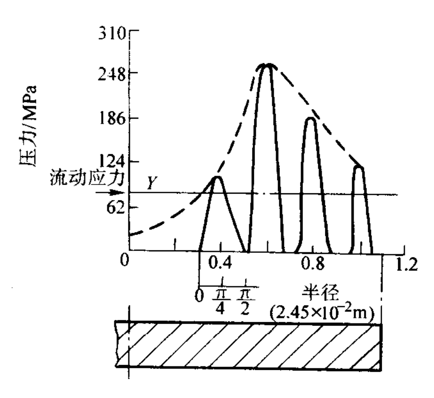


图 5.5-5 单位压力分布曲线

相对变形程度 ε = 25%

3）薄件中心受拉应力。辗压薄件时，被动变形区中与主动被动区相对应的部分（或被动变形区的中部）形成塑性铰链（图 5.5-6）。塑性铰链的内侧切向受拉应力，外侧切向受压应力。塑性铰链的外侧变厚（$\varepsilon_z>0$），内侧变薄（$\varepsilon_z<0$）。塑性铰以外的是弹性变形区。内侧中心在拉应力的作用下变薄甚至拉裂。拉应力区域约在 $0.4r_0$ 范围内。

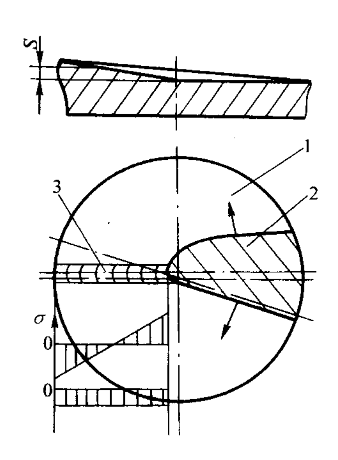


图 5.5-6 变形区分布示意图

1—被动变形区；2—主动变形区；3—塑性铰

工件相对高径比（H/D）越小，摆角愈大，每转进给量愈小，愈易产生拉裂现象。工艺上采用中心局部加厚法可防止中心拉裂的产生。

4）开式自由摆辗易实现径向尺寸的增大，而不易实现高度上的充填。

1.4 摆辗工艺的分类

1）按成形温度。摆辗工艺按成形温度分为：冷摆辗工艺、热摆辗工艺、温摆辗工艺。

冷摆辗工艺是指坯料在再结晶温度以下的成形工艺。实际生产狭义指的是室温摆辗。由于摆辗成形是局部加载，模具与摆辗件之间的摩擦主要是滚动摩擦，成形时接触区的单位压力以及载荷都小于整体锻造，因此，尺寸小些的零件可以在冷态下摆辗。冷摆辗成形时，工件表面质量好、尺寸精度高，达到净形或近似净形加工。同时，由于冷塑性变形的应变强化，工件的强度、硬度、耐磨性和抗疲劳性能都能提高。冷摆辗成形的毛坯或预制坯，若为黑色金属，则需要磷化皂化。

热摆辗工艺是指坯料在再结晶温度之上的成形工艺。对于黑色金属而言，需被加热到 1 100 ~ 1 250℃。热摆辗成形的优点是需要的成形力小，能实现较大的变形，能成形较大

尺寸的工件。因此，大尺寸的工件、冷摆辗时力不够的工件，应选择热摆辗。但采用热摆辗工艺成形的工件，表面粗糙度值高、尺寸精度低，后续机加工量大，材料利用率低。

温摆辗工艺是温度在再结晶温度附近的成形。它吸收了冷、热摆辗工艺的优点，而最大限度地克服了各自的缺陷。温摆辗时，成形力远小于冷摆辗，而产品尺寸精度和表面粗糙度又接近于冷摆辗，也可以实现产品的净形和近似净形加工。温摆辗应用越来越广。

2）按成形工艺。摆辗工艺按工艺特点分为：摆辗锻造工艺、摆辗铆接工艺、其他摆辗工艺。

摆辗锻造工艺主要用于成形各种饼盘类、环类、带法兰的长轴类锻件。根据工件的尺寸大小和精度要求，分别采用冷、热、温摆辗工艺。

铆接是摆辗工艺得到应用的重要领域。由于摆辗铆接无噪声、无振动，与风铆相比非常安静，因此，在非流水生产线上，摆辗铆接得到广泛的应用。目前主要用于车辆、船舶、电气、门窗等工业生产部门中。不同铆头可实现圆头、平面、扩口、卷边等铆接工艺（图5.5-7）。

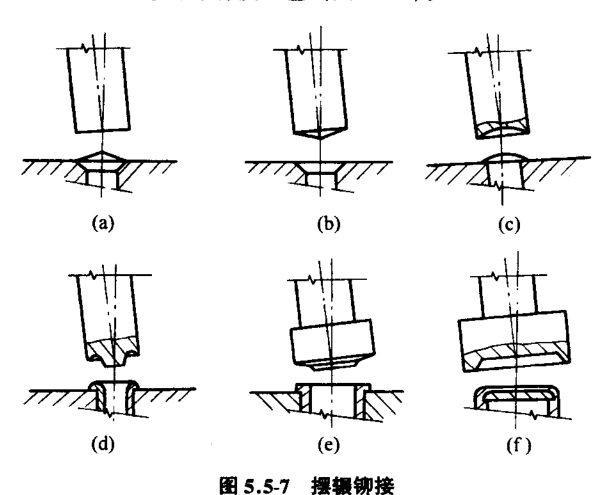


图5.5-7　摆辗铆接

摆辗工艺还可以用于管材和板材的成形。如管子缩口、平板翻边、精冲等（图5.5-8）。

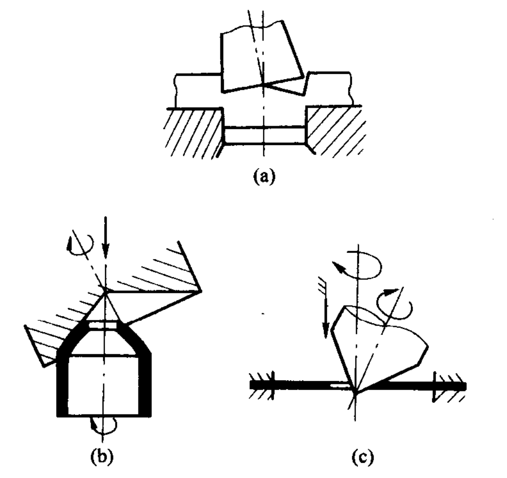


图5.5-8　管材和板材摆辗工艺

1.5　摆辗工艺的适用范围

摆辗工艺是通过局部非对称变形区的连续移动来完成整体变形的。金属径向向外流动容易，轴向流动困难。因此，摆辗工艺主要适宜于薄盘类零件的成形以及薄法兰件的成形。而在轴向方向有较深的薄壁结构的工件不太适合摆辗成形。

摆辗过程中设备始终受偏心载荷。为了提高设备的整体刚度，摆辗机结构比较紧凑，尤其是用于冷精密成形的摆辗机。因此摆辗机的操作空间相对狭小，摆辗工件的尺寸有一定的限制。

冷摆辗成形应用得较好的是瑞士施密特公司（Schmid），其所生产的T630型摆辗机可辗 ϕ190 mm的工件，精度达7级，生产节拍为6～12件/min。

热摆辗成形应用得较好是德国蒂森瓦格纳（Thgsen Wagner）公司，他们将摆动辗压机与辗环机和压力机组成生产线，摆辗机作为终成形闭式模锻。生产的最大无接缝环件直径达 ϕ1 600 mm。

摆辗工艺适用于低碳钢、中碳钢、有色金属的塑性成形。也可用于粉末的压制、成形，板材成形，塑料及陶瓷的铆接。

2　摆辗工艺主要的工艺参数

2.1　摆角 γ

摆角是摆辗工艺的重要标志，当 $\gamma=0$ 时，上模不摆动，工作时与液压机一样。因此，γ 不能太小，太小就显示不出摆动辗压的优越性。

摆角 γ 大小影响接触面积率 λ 的大小，影响轴向压力，影响金属的轴向、径向流动强弱，进而影响生产效率和工件质量。一般而言，γ 角小，金属容易轴向流动，γ 角大，金属容易径向流动；γ 越大，接触面积率 λ 越小，金属容易变形，轴向力减小，径向力和切向力增大，总的辗压力减小，因此，γ 越大，越省力；但 γ 增大，摆辗机机身和导轨上的水平分力也增加，使机器的振动加大，机床精度降低，轴承寿命减小；γ 角过大时，还会使金属变形不均匀增加，蘑菇效应更强。γ 值对成形工艺的影响也与每转进给量有关。

根据摆辗方法的不同，γ 角的选用也不同。冷摆辗时，选较小的摆角和较小的每转进给量 S，通常取1°～2°。热摆辗时，取较大的 γ 角和较大的每转进给量 S，通常取3°～5°。铆接时，为了加快金属径向流动，γ 角通常取4°～5°，摆角 γ 与轴向压力的关系曲线如图5.5-9。

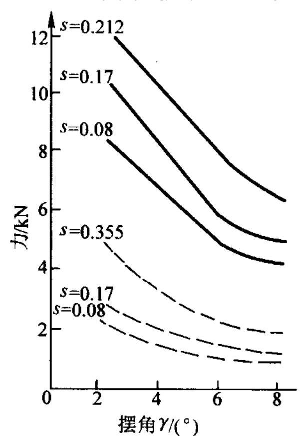


图5.5-9　摆角与轴向压力关系曲线
材质：——低碳钢　－－－－－铝
工件尺寸：ϕ4.7 mm　摆头转速：530 r/min

2.2　每转进给量 S

摆辗每转进给量 S（mm/r）是摆辗成形阶段中一个周期



的压下量。摆辗过程包括上料、下滑块上升、摆辗成形、下滑块回程、卸料5个阶段。在摆辗成形阶段，摆头每转进给量的表达式为：

$$S = 60\Delta H/(tn) \tag{5.5-1}$$

瞬时应变为：

$$\varepsilon = \ln\frac{H}{H-S} \tag{5.5-2}$$

式中，ΔH 为毛坯压下高度，mm；t 为摆头与毛坯接触后的辗压时间，s；n 为摆头转速，r/min；H 为摆辗件瞬时高度，mm。

摆辗每转进给量是计算接触面积的大小、塑性变形区的深度及摆辗时间的基本因素。当 S 较小时，接触面积也小，变形量易在接触表面，易产生"蘑菇效应"，同时伴有锻不透现象。为了保证"锻透"，必须要有足够的每转压下量 S（或足够的辗压力）。为了使塑性变形区发展到整个工件高度，消去"蘑菇效应"现象，一般选择 S 时应使计算的接触面积λ 值所形成的外边缘的弧长大于毛坯高度（$\alpha > H$），最小 S 值按下式计算：

$$S_{\sin} = \frac{H^2}{4R}\tan\gamma \tag{5.5-3}$$

式中，H 为毛坯高度，mm；R 为毛坯半径，mm；γ 为摆角，(°)

较大的每转进给量会使接触面积 λ 增大，塑性区能达到整个高度，变形均匀，生产率高。但轴向力上升（图5.5-10），因此，每转进给量的大小直接关系到设备吨位和摆头电动机功率的大小。在设备吨位允许的情况下，应尽量增加 S 值。一般 S 的选取应使 $\lambda = 0.20 \sim 0.23$ 为宜。

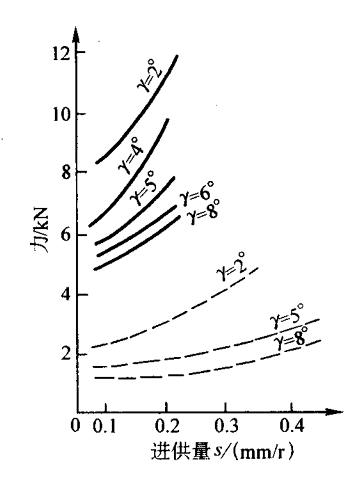


图 5.5-10　每转进给量和轴向压力关系

材质：——低碳钢　- - - - - 铝

工件尺寸：ϕ4.7 mm　摆头转速：560 r/min

2.3　摆头转速 n

摆头转速的高低影响摆辗生产率、摆头电动机功率和工件的质量。一般而言，摆头转速对工件的成形性影响不大，对设备吨位影响不大（图5.5-11）。为了提高生产率，可使转速高些，但需要大的电动机功率，机架受力恶化，振动加大，机器容易发生故障，也使成形后的工件表面粗糙度值增大。但转速高能够缩短摆辗成形时间，缩短毛坯在模腔中的滞留时间，对于温、热摆辗而言，可延长模具使用寿命。因此，一般来说，设备吨位小的，转速可取高一些，如摆辗铆接；吨位大的，转速应取低一些。一般摆头转速通常为30～300 r/min。国产的4 000 kN摆辗机的转速取 n = 965 r/min，而日本的MCOF型4 000 kN摆辗机转速达500 r/min。

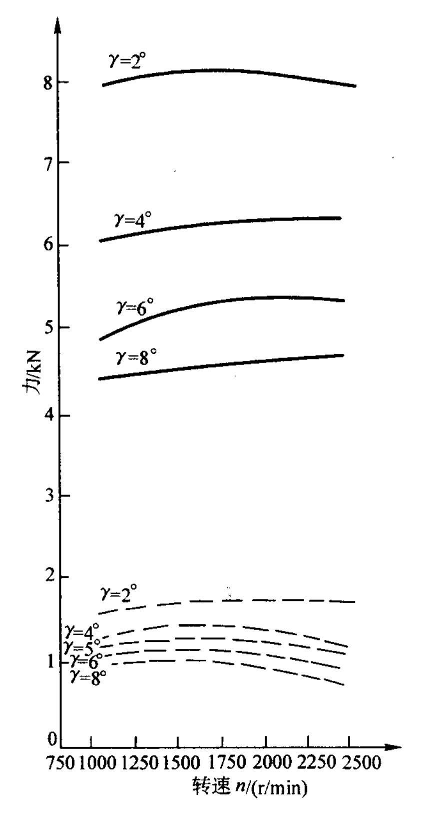


图 5.5-11　摆头转速和轴向压力关系

材质：——低碳钢　- - - - - 铝

工件尺寸：ϕ4.7 mm　每转进给量：s = 0.05 mm/r

2.4　摆头轨迹

摆头轨迹是指摆辗时摆头（也称摆杆）上端的空间球面轨迹。而模具上的一点在空间的轨迹与摆杆上端的空间轨迹是相似的，因此，模具与毛坯接触面积的位置的变化规律与摆杆上端的空间轨迹也是相似的。我们研究摆头轨迹实质上研究接触面或成形区的轨迹。

摆头轨迹的水平投影可用图5.5-12中矢量 $\overrightarrow{OO_2}$ 的终点位置来表示。它是两个旋转运动的合成。

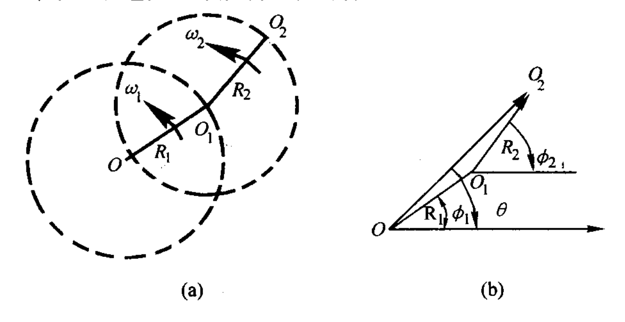


图 5.5-12　摆头运动分析模型

$\overrightarrow{OO_2}$ 矢量的矢径与极坐标的角度分别为：

$$|\overrightarrow{OO_2}| = 2R\left|\cos\frac{\beta-1}{\beta+1}\theta\right| \tag{5.5-4}$$

$$\theta = \frac{1}{2}(\beta+1)\omega_1 t \tag{5.5-5}$$

式中，ω_1、ω_2 为角速度，rad/min；$\beta = \omega_2/\omega_1$ 为角速度的比值；t 为时间，min。

根据角度速比值 β 的不同，图形表现为5种形态（图5.5-13，图5.5-14）。

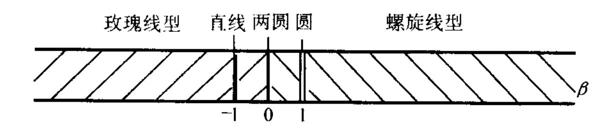


图 5.5-13 图形与 β 的关系

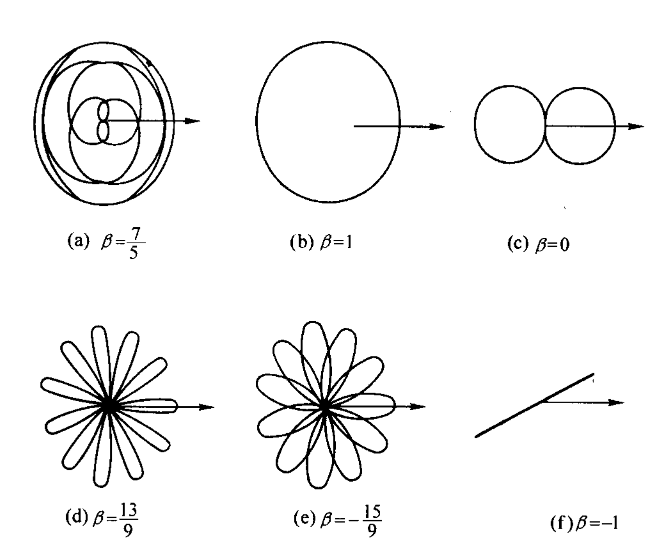


图 5.5-14 摆头轨迹

1）当 $\beta>0$ 且 $\beta\neq1$ 时，图形为螺旋线型。

2）当 $\beta=1$，图形为圆心在坐标原点的圆。

3）当 $\beta=0$，图形为圆心在（0，$-R$）、（0，R）处的两圆。

4）当 $\beta<0$，且 $\beta\neq-1$，图形为玫瑰线型。

5）当 $\beta=-1$，图形为定直线。

圆轨迹时，摆头轴线与下模轴线始终保持为 γ 角，在均匀进给的情况下，接触面积率 λ 始终保持定值。成形力的合力作用点作等速圆周运动，因而，摆辗过程稳定且变形均匀，对简单回转体特别合适。

玫瑰线轨迹时，摆头轴线与下模轴线的夹角在 $0\sim\gamma$ 之间变动，接触区的大小、合力作用点都在产生周期性改变，理论上存在“死区”。叶瓣数越多，频率越快，因此，变形不均匀性不及圆轨迹，同时摆辗机振动大。

螺旋线轨迹的特征介于圆轨迹与玫瑰线轨迹特征之间。

直线轨迹时，摆头作往复直线运动，始终只与直线区的毛坯端面接触，理论上特别适宜于齿条和直齿圆锥齿轮的冷摆辗。但对直齿圆锥齿轮而言，下模需要装间歇转动装置，下模齿间要与直线轨迹准确定位，这给生产操作增加了难度，降低了生产效率，生产应用并无优越性。

双圆轨迹与玫瑰线轨迹相似，存在“死区”，变形不均匀性及摆辗机的振动小于玫瑰线轨迹。

现实生产中多采用圆轨迹，其他轨迹没有明显的实用优势。

3 摆辗工艺的力能参数

3.1 摆辗接触面积率 λ

以圆柱体形工件的摆辗为对象，介绍接触面积率。摆动辗压过程中，由于滑块带着毛坯进给的同时，摆头也在运动，因而摆头与毛坯的接触面是一螺旋面，其螺距等于摆头转一周时滑块上升的位移，其接触面的水平投影 F_C 与坯料上表面的 F 的比值称为接触面积 λ，即

$$\lambda=\frac{F_C}{F}=\frac{F_C}{\pi R^2}=\frac{R}{3\pi S\cot\gamma}\left[2\frac{S}{R}\cot\gamma\times\left(\frac{S^2}{R^2}+1\right)^{\frac{1}{2}}-\frac{S^2}{R^2}(\cot^2\gamma+1)^{\frac{3}{2}}\right]+\frac{1}{4}-\frac{1}{2\pi}\arcsin\left[\left(\frac{S^2}{R^2}+1\right)^{\frac{1}{2}}-\frac{S}{R}\cot\gamma\right]-\frac{1}{2\pi}\left[\left(\frac{S^2}{R^2}+1\right)^{\frac{1}{2}}-\frac{S}{R}\cot\gamma\right]\left[2\frac{S}{R}\cot\gamma\times\left(\frac{S^2}{R^2}+1\right)^{\frac{1}{2}}-\frac{S^2}{R^2}(\cot^2\gamma+1)\right]^{\frac{1}{2}} \tag{5.5-6}$$

式中，R 为毛坯半径，mm；S 为每转进给量，mm；γ 为摆角，(°)。

式（5.5-6）的简化式为

$$\lambda=0.63Q^{\frac{1}{2}}-0.124Q^{\frac{1}{3}} \tag{5.5-7}$$

式中 $Q=\frac{S}{2R}\cot\gamma$

关于 λ 的计算有许多简化式。有波兰马尔辛尼克（Z.Marciniak）式［式（5.5-8）］，日本久保胜式［式（5.5-9）］。

$$\lambda=0.45\left(\frac{S}{2R}\cot\gamma\right)^{\frac{1}{2}} \tag{5.5-8}$$

$$\lambda=\left(0.48\frac{S}{R}\cot2\gamma\right)^{0.68} \tag{5.5-9}$$

就以上三个简化式的精度而言，式（5.5-7）的值比较精确，最大相对误差为 3.5%；式（5.5-8）的值偏小，最大相对误差达 13.1%；式（5.5-9）的值偏大，最大相对误差达 26%。

3.2 摆辗力

摆辗时所需成形力 P（kN）为摆辗接触面积与作用在该面积上平均单位压力之积，即：

$$P=F_Cp\times10^{-3} \tag{5.5-10}$$

式中，F_C 为接触面积，mm^2；p 为平均单位压力，MPa。

接触面积可根据式（5.5-6）或其简化式（5.5-7）算出 λ，再计算 F_C。

平均单位压力 p 的计算方法有二种。

（1）经验公式

$$p=K\sigma_S \tag{5.5-11}$$

式中，σ_S 为材料在成形温度下的流动应力，MPa；K 为成形形式系数，自由镦粗时 $K=1.5\sim1.7$；局部镦粗时 $K=1.6\sim1.9$；模膛内成形时 $K=2.0\sim2.3$。

（2）理论公式

$$K=\frac{H}{H+S}+\mu\left[\frac{3R}{3(H+S)}+1\right]+\frac{h}{2S}\left[1-\left(1+\frac{S}{H}\right)^{-\frac{1}{2}}\right]+\frac{H}{4\pi\lambda(H+S)} \tag{5.5-12}$$

式中，H 为毛坯某瞬时最低高度，mm；R 为毛坯某瞬时半径，mm；S 为每转进给量，mm；μ 为摩擦系数。

3.3 摆头电动机功率

摆头在给毛坯施加力时，还要产生回转运动，因此摆头电动机功率是摆辗设备主要参数之一。摆头电动机功率的计算有如下几个公式。

1）式（5.5-13）适用于接触面积率 $\lambda<\frac{1}{4}$ 的情况，在初步进行摆辗设计时可采用此式。

$$N=127.5\times10^{-8}\frac{Pn}{\eta}DS\arccos\left(1-\frac{2S}{D\tan\gamma}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{5.5-13}$$



式中，P 为机器的实际吨位，kN；n 为摆头实际转速，r/min；γ 为摆角，(°)；D 为毛坯最后直径，mm；S 为毛坯每转进给量，mm；η 为传动部分总效率。

2）式（5.5-14）的计算值一般偏大。

$$N = \frac{Mn_1}{9\ 750 i\eta} \tag{5.5-14}$$

其中
$$M = \frac{1}{3}Pa\tan\gamma + \mu P\gamma_1 \quad \text{N·m} \tag{5.5-15}$$

式中，P 为机器的实际吨位，N；a 为接触弧长，$a \approx \lambda 2\pi R$，m；R_1 为止推轴承滚子中心到轴线的距离，m；γ 为摆角，(°)；μ 为摩擦系数；n_1 为电动机转速，r/min；i 为电动机轴到主轴的传动比；η 为电动机到摆头的传动效率。

3）式（5.5-16）用于计算摆辗铆接机电动机功率，对于大吨位机器不太适合。

$$N = \frac{Mn}{9\ 750\eta} \tag{5.5-16}$$

其中
$$M = P\frac{R}{2} \times 10^{-3}\sin\left[\frac{1}{2}\arccos(1-4Q)\right] \quad \text{N·m}$$

$$Q = \frac{S}{2R\tan\gamma} \tag{5.5-17}$$

式中，P 为机器吨位，N；R 为毛坯最后半径，mm；S 为每转送进量，mm；n 为摆头转速，r/min；η 为传动系统效率，初取 $\eta = 0.8$。

4 摆辗工艺的模具设计

4.1 摆辗模具工况

摆辗是连续局部成形工艺，其省力特点也带来模具工作条件较差，尤其是热摆辗。具体如下。

1）模具与热毛坯接触时间长、温升高，有的可达700℃～800℃。若超过模具材料的回火温度，易软化变形。

2）模具整体受力始终是不对称的，在每件的摆辗中都会产生几次甚至几十次的交变载荷作用，容易产生疲劳破坏。

3）热摆辗模具采用外部冷却，模具中心与模具表面温差较大，热应力严重，可能导致模具产生裂纹或破碎。

摆辗模具常出现的失效形式有以下几种。

1）塑性变形。由于模具材料在高压高温下，突出部分的受力超过其屈服强度，产生塑性变形——塌陷。

2）侧壁周围纵向裂纹。下模中圆形模膛的侧壁在摆辗毛坯时，承受切向拉应力。频繁的交变应力易使侧壁萌生微裂纹。当裂纹扩展变成可见的纵向裂纹时，对冷精密摆辗件而言，工件的尺寸精度和表面粗糙度已不合要求，模具失效。

3）热疲劳龟裂。由于热应力而造成模具型腔粗化，部分脱落。

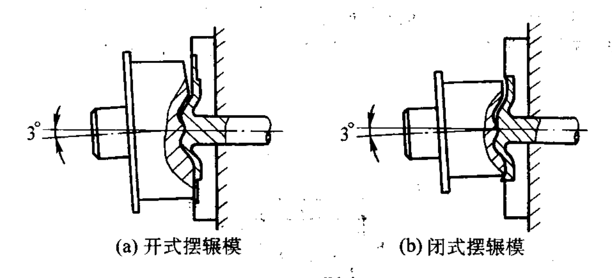
4）脆性破裂。当模具硬度过高，模具结构不合理时，易产生应力集中，并萌生裂纹。脆性破裂是模具在摆辗工作过程中因自身裂纹快速扩展突然发生的脆性断裂现象。

4.2 摆辗成形件图的设计

摆辗根据辗压温度的不同分为热摆辗、温摆辗、冷摆辗3种。热摆辗主要优点是省力，其成形后工件的精度和表面粗糙度等与热模锻压力机上模锻件相近；冷摆辗的优点是精度高，表面质量好，可接近产品图的精度和粗糙度等要求；温摆辗综合了冷摆辗和热摆辗两个方面的优点。尽管它们的精度和成形力不同，但其成形件图的设计原理是相同的，都遵循根据零件图来设计成形件的原则。

1）确定机械加工余量和公差。热摆辗时，加工余量和公差均可按曲柄压力机上模锻来选取。冷摆辗时，可按无余量摆辗处理，公差可取0.03 mm。

2）分模面的选择。选择分模面的基本要求是保证摆辗成形结束后，工件能从模腔中方便地取出。摆辗模根据锻件外轮廓形状不同分为开式和闭式两类，如图5.5-15。开式模摆辗时锻件有飞边，需要摆辗后切除，增加了工序。只有当摆辗件外轮廓形状是非回转体锻件时才采用开式模，如摆辗成形六角螺钉头等。闭式模有许多优点，如不需要切飞边工序，虽然有纵向毛刺，但对机械加工影响不大，金属在闭式模内容易充满模膛，且材料利用率高，闭式模尺寸比开式模小等。但闭式模对制坯的形状精度和体积精度要求高。



(a) 开式摆辗模　(b) 闭式摆辗模

图 5.5-15　摆辗模具

闭式模分模面应选在锻件最大轮廓尺寸靠近凸模的一面，以便在开模时锻件不会紧套在摆动凸模上，或摆头与已成形的外表面相切、刮伤。如图5.5-16的圆柱齿轮，应选 C—C 面作为分模面。

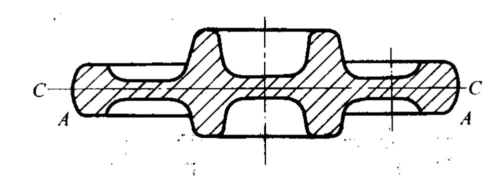


图 5.5-16　圆柱齿轮坯摆辗分模面的选择

3）拔模斜度。由于摆辗机一般都具有顶料装置，因此拔模斜度比模锻小，一般取2°～6°，外壁斜度取小值，内壁斜度取较大值，冷摆辗时拔模斜度可取1°～3°，也可取0°。

4）圆角半径。摆辗锻件的圆角半径可参照机械压力机上模锻的圆角半径选取。

4.3 摆辗模模具设计

1）摆辗模结构设计。摆辗模模具结构分立式摆辗模和卧式摆辗模两类。

立式摆辗模用于立式摆辗机，适合摆辗短轴类锻件。它由上面的凸模（与摆头相连）和下面的凹模组成。锻件形状复杂的部分，特别是具有非回转体的部分，均在凹模中成形，而形状简单的部分放在凸模内成形。

卧式摆辗模用于卧式摆辗机，适合摆辗带法兰的长轴类锻件。它与平锻模相似，是由一块凸模和两块凹模组成（图5.5-17），即凸模1、活动凹模5和固定凹模6。凸模通过压紧圈2和螺钉3紧固在摆头4上。活动凹模通过压板8和螺钉9固定在夹紧滑块7上，而固定凹模则固定在工作台10上，二者组成一个完整的凹模。

摆辗模具根据结构不同分为整体式摆辗模和镶块式组合模。镶块式组合模的使用主要有两个目的，一是将整体式模具中最易磨损、最易产生塑性变形的部位用强度较高的金属镶块取而代之，一旦模具磨损，只需更换局部镶块；二是对

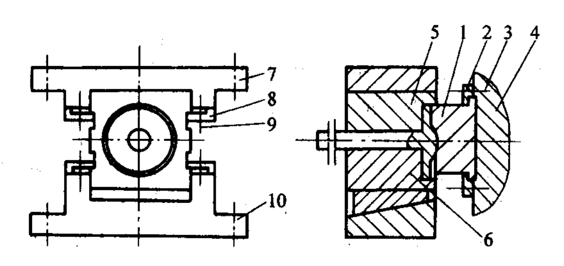


图 5.5-17 卧式摆辗模结构

1—摆动凸模；2—压紧圈；3、9—螺钉；4—摆头；5—活动凹模；6—固定凹模；7—夹紧滑块；8—压板；10—工作台

模膛中易产生应力集中的部位分块，消除应力集中。采用镶块组合模可显著地提高模具寿命和生产率。图 5.5-18 是镶块模的典型结构。图 5.5-19 为有代表性的凹模凸台镶块。

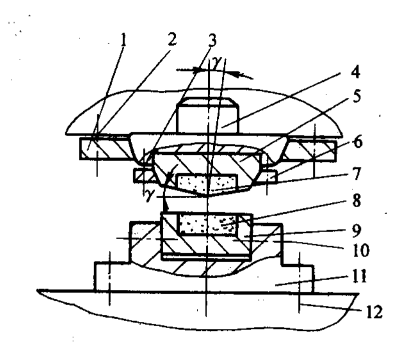


图 5.5-18 镶块模的典型结构

1—上模压板；2、3、10、12—螺钉；4—模板；5、9—外套；6—压板；7、8—镶块；11—模板

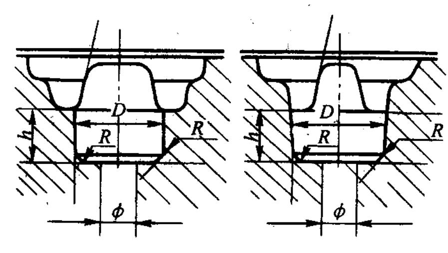


图 5.5-19 凹模凸台镶块

一般而言，模具尺寸较大、产品批量较大时，应采用镶块模，这样可降低模具成本。

2）摆辗模模膛设计　摆辗模的模膛由凸模和凹模的相应的部分组成。凹模的模膛尺寸均按机械压力机上的锻模模膛设计，即按锻件图的相应的尺寸和形状进行设计。而凸模是一个具有锥顶角 $180°-2\gamma$ 的圆锥体，且轴线与机器主轴成 γ 角，所以凸模模膛尺寸和形状都要根据锻件图进行重新设计和计算，其方法如下。

① 锻件图中直径最小的回转平面中心 O，在凸模中将其设计成为圆锥或圆锥台的顶点 O'（图 5.5-20）。

② 锻件图中锻件轴线就是凸模的轴线，也就是圆锥或圆锥台的轴线。

锻件图上凡与轴线相垂直的各圆平面，在凸模上都设计成圆锥面或圆锥台面，其锥顶角均为 $\alpha=180°-2\gamma$，如图 5.5-20 所示。

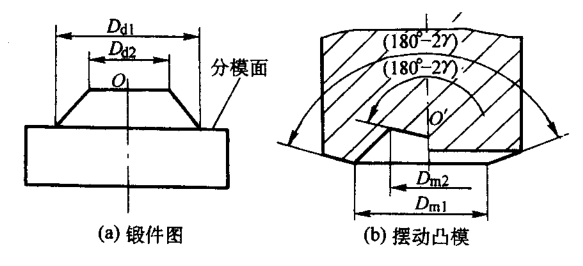


图 5.5-20 摆动凸模设计之一

圆锥母线长等于锻件图中各圆平面的半径。

圆锥或圆锥台底面直径为：

$$D_{mn}=D_{dn}\cos\alpha \pm 2H_{dn}\sin\gamma$$

式中，D_{mn} 为圆锥底面直径；D_{dn} 为锻件各圆平面直径；H_{dn} 为锻件两相邻圆平面的高度；γ 为摆角。

当锻件最大圆平面在最小圆平面之上者取“-”号，反之取“+”号。

当 $H_{dn}=0$ 时，$D_{mn}=D_{dn}\cos\gamma$。

③ 凸模斜度与锻件斜度关系如下（图 5.5-21）

$$\beta_{imn}=\beta_{odn}-\gamma$$
$$\beta_{omn}=\beta_{idn}+\gamma$$

式中，β_{imn} 为凸模内斜度；β_{odn} 为锻件外斜度；β_{omn} 为凸模外斜度；β_{idn} 为锻件内斜度。

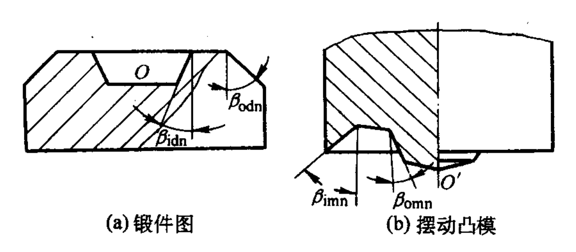


图 5.5-21 摆动凸模设计之二

④ 锻件图上两相邻平面间的高度 H_{dn}，应等于凸模两相邻圆锥面间的垂直高度 H_{mn}，即 $H_{dn}=H_{mn}$，如图 4.7-22 所示。

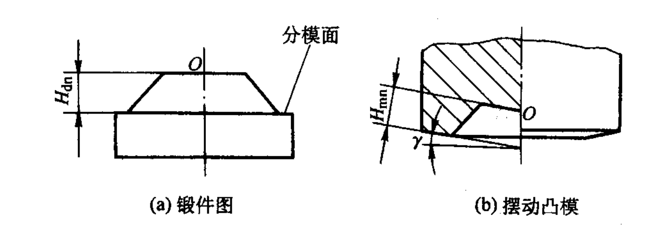


图 5.5-22 摆动凸模设计之三

⑤ 凸模圆角半径和锻件图中圆角半径相等。即 $R_{mn}=R_{dn}$，但它的圆心要增加一偏移量 e，如图 5.5-23 所示，$e=H_{dn}\sin\gamma$。

⑥ 凸模圆锥顶点 O 到模具安装面距离 H 应等于摆动中心 O' 到摆头模座面的距离 H_1，如图 5.5-24 所示，即 $H=H_1$。否则，当 $H<H_1$ 时，由摆动凸模成形的锻件尺寸必然大于锻件上相应的直径尺寸，反之，则小于锻件上相应的直径尺寸。

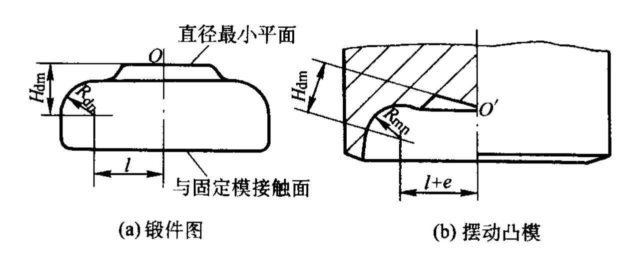
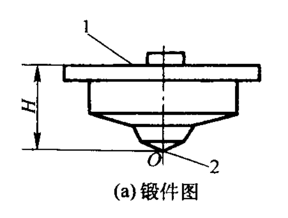


图 5.5-23 摆动凸模设计之四



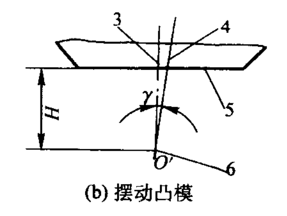


图 5.5-24 摆动凸模设计之五

1—安装面；2—圆锥顶点；3—凸模轴线；
4—摆动中心线；5—模座底面；6—摆动中心

⑦ 凸模与凹模间的间隙。采用闭式模摆辗时，凸模进入凹模中，因此二者间应留有间隙，如间隙过大，则纵向毛刺增厚，不易去除。反之，由于模具热胀又容易卡住，二者间隙建议按表 5.5-2 选取。

表 5.5-2 摆动凸模与固定凹模间的间隙 mm

锻件直径	间隙
80 ~ 120	0.20 ~ 0.40
120 ~ 180	0.40 ~ 0.65
180 ~ 280	0.65 ~ 0.95
280 ~ 390	0.95 ~ 1.20

由于凸模外形有圆柱形和圆锥形两种，相应的凹模应有所不同。当摆动凸模外形为圆柱形时，则凹模与其相配合部分做成锥度为 γ 的圆锥孔，如图 5.5-25 所示。当凸模外形为 $180° - 2\gamma$ 的倒圆锥台时，则凹模与之相配合部分做成锥度为 $\gamma/2$ 的圆锥孔或无锥度的圆柱孔，如图 5.5-26 所示。此间隙可选取较小值。

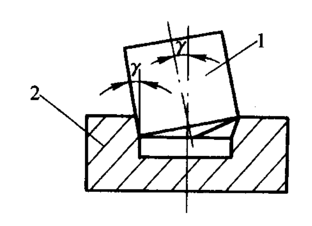


图 5.5-25 摆动凸模设计之六

1—圆柱形摆动凸模；
2—固定凹模

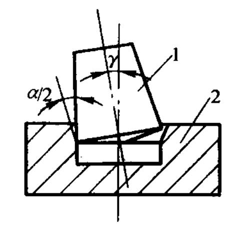


图 5.6-26 摆动凸模设计之七

1—倒锥形摆动凸模；
2—固定凹模

几种典型锻件凸模设计计算公式见表 5.5-3。

表 5.5-3 凸模模膛设计计算公式表

序号	摆动凸模成形部分锻件图	摆动凸模模膛尺寸	计算公式
1			$D_{m1} = D_{d1}\cos\gamma$ $D_{m2} = D_{d2}\cos\gamma - 2H_{d1}\sin\gamma$ $D_{m3} = D_{d3}\cos\gamma + 2H_{d2}\sin\gamma$ $D_{m4} = D_{d4}\cos\gamma + 2H_{d3}\sin\gamma$ $D_{m5} = D_{d5}\cos\gamma + 2H_{d3}\sin\gamma$ $H_{m1} = H_{d1}$ $H_{m2} = H_{d2}$ $H_{m3} = H_{d3}$ $\beta_{m1} = \beta_{d1} - \gamma$ $\beta_{m2} = \beta_{d2} - \gamma$ $\beta_{m3} = \beta_{d3} + \gamma$
2			$D_{m1} = D_{d1}\cos\gamma$ $D_{m2} = D_{d2}\cos\gamma - 2H_{d1}\sin\gamma$ $H_m = H_d$ $\beta_m = \beta_d - \gamma$
3			$D_{m1} = D_{d1}\cos\gamma$ $D_{m2} = D_{d2}\cos\gamma - 2H_{d1}\sin\gamma$ $H_{m1} = H_{d1}$ $H_{m2} = H_{d2}$ $R_m = R_d$ $e = H_{d2}\sin\gamma$

续表 5.5-3

序号	摆动凸模成形部分锻件图	摆动凸模模膛尺寸	计算公式
4			$D_{m1} = D_{d1}\cos\gamma$ $D_{m2} = D_{d2}\cos\gamma + 2H_{d1}\sin\gamma$ $H_{m1} = H_{d1} \quad H_{m2} = H_{d2}$ $R_m = R_d \quad e = H_{d2}\sin\gamma$
5			$D_{m1} = D_{d1}\cos\gamma$ $D_{m1} = D_{d2}\cos\gamma + 2H_d\sin\gamma$ $H_m = H_d \quad \beta_m = \beta_d + \gamma$

5 摆动辗压设备

5.1 摆动辗压设备的工作原理

摆动辗压设备，也称为摆动辗压机，简称摆辗机。是用于摆辗工艺的专用塑性成形设备。

摆辗机一般由摆头、滑块、液压缸、机身（上横梁、下横梁、立柱和拉紧螺栓等）和机械传动系统等五个重要部分组成，如图 5.5-27 所示。

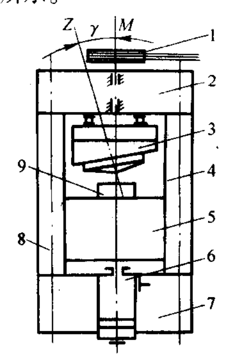


图 5.5-27 摆辗机示意图

1—机械传统系统；2—上横梁；3—摆头；4—立柱；5—滑块；6—送进液压缸；7—下横梁；8—拉紧螺栓；9—毛坯

摆辗机由两套动力系统驱动两种运动，一是使摆头 3 作转动或摆动的机械传动系统，另一是推动滑块 5 作往复直线运动的液压传动系统。摆头轴线与机器主轴成 γ 角。其工作原理为：上模固定在摆头上，当主轴旋转时，上模同摆头一起作摆动运动；下模固定在滑块上，毛坯放在下模上，滑块在送进油缸的推动下同毛坯一起向上运动；当毛坯接触到摆动的上模时，毛坯的局部区域在上、下模间产生塑性变形，且这个局部区域有规律地变化着。在整个摆辗过程中，摆头一直承受偏心载荷，合力作用点在不断地绕机身轴线作轨道运动。上模与坯料之间主要是滚动摩擦。由于上模是对毛坯端面的局部施压，不像常规的塑性成形设备是作用在毛坯的整个端面，因此，摆辗所需的变形载荷小，能够代替公称力是其 5～20 倍的常规塑性成形设备。

5.2 摆动辗压设备的分类

根据出发点不同摆辗机有几种分类。

1）按机身轴线位置分类。摆辗机按机身轴线位置分为立式摆辗机和卧式摆辗机两类。

立式摆辗机机身轴线、液压缸运动方向是竖直的，是国内外最常见的一种摆辗机。它操作方便，受力情况好，占地面积小，适用范围广，易于实现机械化与自动机。

卧式摆辗机机身轴线、液压缸运动方向则是水平的。卧式摆辗机的滑块行程一般较立式摆辗机长，它能摆辗加工带长轴的法兰零件。我国的卧式摆辗机主要是用来加工各种汽车和拖拉机后半轴和车床主轴等。

2）按用途分类。摆辗机按用途分为锻造摆辗机和铆接摆辗机两类。锻造摆辗机用于成形各种零件，一般吨位较大；铆接摆辗机用于两个零件之间的联接，一般吨位较小。

3）按摆头结构分类。摆辗机的主要特征结构是摆头。摆辗机按摆头结构形式不同分为滚动轴承式和滑动轴承式（含静压轴承式）两类。

滚动轴承式摆头结构如图 5.5-28 所示。它采用推力轴承和向心轴承分别承受偏心载荷所引起的轴向力和径向力，结构比较简单，加工容易。但这种结构的设备的轮廓尺寸较大，轴承易坏，且噪声大。

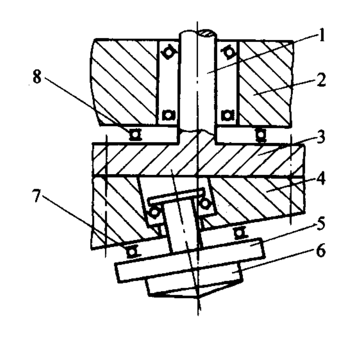


图 5.5-28 滚子轴承式摆头结构

1—摆轴；2—上模；3—摆轴盘；4—偏心斜盘；5—摆头座；6—摆头；7、8—推力轴承

静压轴承摆头结构如图 5.5-29 所示。摆头主要由带柄的半球体、球座和使半球体摆动的偏心套等组成。球座上开设有几个均匀油腔及相应的封油面和回油槽。摆辗机工作时，在球头、球座之间建立一层静压油膜，承受全部辗压力而不被挤出，保证在相对运动时处于完全液体摩擦的润滑状态。这种结构的摆辗机结构紧凑，刚度好，球头与球座磨损小，但其内外球面加工困难。



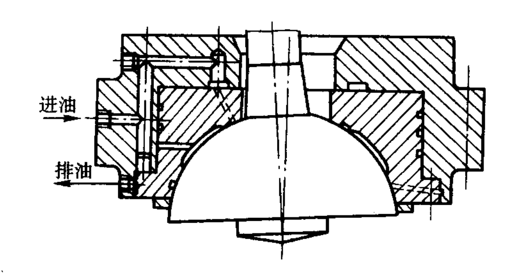


图5.5-29 静压轴承式摆头结构

5.3 摆动辗压设备的主要参数

摆动辗压设备的主要技术参数是公称力和辗压最大直径等。国内、外部分摆辗机的主要技术参数见表5.5-4和5.5-5。

5.4 摆动辗压设备的结构

(1) 摆头

摆辗设备的特殊性体现在摆头上，它是实现摆辗工艺的关键部件。

表5.5-4 国内部分摆辗机主要技术参数

参数 \ 型号	30	100	160	200	400	630
公称力/kN	300	1 000	1 600	2 000	4 000	6 300
辗压最大直径/mm	80	200	210	200	400	200
摆头转速/r·min^{-1}	289/399/594	200	69/92/138	240	96	200
每转送进量/mm·r^{-1}	0.2~6	3~6	0.22~8.7	6	1.5	—
摆角/(°)	3	3	3	3	3	0~2
最大行程/mm	200	—	230	150	200	245
顶出力/kN	15	—	40	—	300	200
工作台尺寸（长/mm×宽/mm）	440×440	—	650×610	700×650	1 250×940	—
电动机功率/kW	13/13/19	—	20/25/28	37	130	75
摆头轴承类型	滚动轴承	静压轴承	静压轴承	滚动轴承	滚动轴承	—
机身结构	焊接框架	焊接框架	铸造	焊接框架	焊接框架	—
送进方式	液压缸下进给	液压缸下进给	液压缸下进给	液压缸下进给	油缸下进给	—
研制单位	哈尔滨工业大学	天津锻造厂	上海新华轴承厂	北京工具厂	哈尔滨齿轮厂	重庆五九研究所

表5.5-5 国外部分摆辗机主要技术参数

参数 \ 型号	PXW100	PXW200	PXW630	T-200	T-400	T-630
公称力/kN	1 000	2 000	6 300	2 000	4 000	6 300
辗压最大直径/mm	—	140	—	90	250	250
顶出力/kN	—	—	—	400	700	700
摆动频率/r/min	200	400	400	0~340	0~280	0~280
滑块行程/mm	140	120~140	300	200	285	300
下顶料杆行程/mm	80	20~100	160	60	98	115
摆角/(°)	2	2	2	—	—	—
滑块空行程速度/mm·s^{-1}	148	100	140	125~150	180~200	150~200
滑块成形速度/mm·s^{-1}	9.5	12	20~30	26	28	22
装机功率/kW	38	78.5	270	67	170	280
设备质量/kg	5 500	10 000	37 000	10 200	25 800	39 000
机器外形尺寸（长/mm×宽/mm×高/mm）	2 700×2 000×2 500	2 800×2 500×3 300	6 000×3 000×5 000	—	—	—
国别	波兰			瑞士		

1) 摆头结构。根据轴承型式的不同，摆头结构细分为三种。

① 滚动轴承式摆头。该结构如图5.5-28所示。它的结构特点是在摆辗机主轴上安装一个上端为一水平面、而下端与水平面成一个γ角的斜盘，以实现摆动运动。当传动部分带动摆轴1旋转时，斜盘4随之旋转，而安装在斜盘偏心孔内的摆头座5便带动摆头6产生摆动运动。

该结构的优点是结构简单，容易加工制造，维修方便，

功率消耗小，但轴承易坏。

② 滑动轴承式摆头。该结构如图5.5-30所示。这种结构的特点是在摆头上装有一个或内外两个偏心套和一个滑动球头。偏心套上端与机器主轴相联，内有一偏心孔，其轴线与套的轴线相交γ角，滑动球头的尾柄部分镶入到偏心孔中，于是滑动球头的轴线与机器主轴线也形成γ角，滑动球头的另一端与球形衬套相配合。主轴旋转时，偏心套跟随旋转，于是滑动球头带动上模产生摆动。

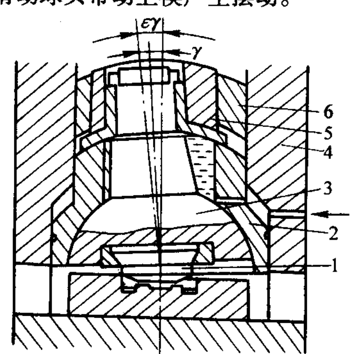


图5.5-30　滑动轴承式摆头示意图

1—上模；2—球面衬套；3—滑动球头；4—机架；5—内偏心套；6—外偏心套

③ 静压轴承式摆头。该结构如图5.5-29所示。该结构的特点是滑动球头和球面衬套之间建立了一层静压油膜，以便让滑动球头和球面衬套之间的相对运动处于完全液体摩擦状态。该结构紧凑，刚度好。但球面加工困难。

2）防止摆头自转装置。摆辗时，要求上模只做线滚动，而不允许有自转。但是，由于受摩擦的作用，在空转时，上模往往要随摆轴一起转动。由于这种自转，在辗压开始时，毛坯常被甩离原来的中心位置，使成形后的工件形状得不到保证。同时，由于锥形上模接触毛坯后相对毛坯产生一滞后角，即摆辗一周后不能回到原始位置。

防转装置有两种。一是大齿圈防转装置，筒形的上齿圈固定在斜盘上，下齿圈固定在立柱上。下齿圈设计成横断面为齿条形的平面伞齿，而上齿圈下端为一个锥齿轮，其分度圆锥角的余角等于摆角。其节锥线应与锥形上模的母线在同一平面内。另一种防转装置是拨杆机构，如图5.5-31。这种结构的防转杆安装在球头或摆头模座上，挡板固定在机架上，防转滚轮在挡板之间滚动。该结构和大齿圈相同，它既可在空转时防止摆头自转，也可在摆辗时防止上模滞后，以保证上下模在任何时候均不产生相对错动。

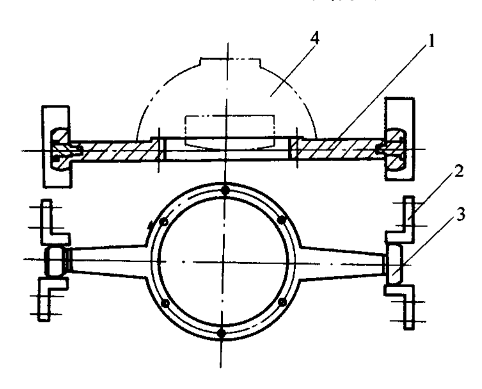


图5.5-31　拨杆防转装置

1—防转杆；2—挡板；3—滚轮；4—球头

（2）滑块

滑块是一个传递力的部件，它将液压缸的推力传递给毛坯，使毛坯产生塑性变形。下模通过梯形槽与螺钉固定在滑块上端。滑块下端和液压缸中的活塞杆联接。滑块四周有导轨。工作时，滑块在液压缸推动下沿导轨作上下往复运动。

滑块结构分为箱形滑块和圆形滑形两种。

箱形滑块在滑块四个角上设有导向面，它和机身上的导轨相互滑动配合，并通过一组推拉螺钉来实现间隙的调整。间隙一般为0.01 mm左右。同时，为了保证导向精度，滑块的导向面要有足够的长度。滑块高度与宽度之比应大于1，一般在1.08～1.32之间选择。

圆形滑块整个圆柱面都是导向面，导轨是圆筒形，因此，此结构承受非对称的交变载荷的能力强，与箱形滑块相比，有以下优点。

1）圆形滑块与导轨在圆周方向上刚性一致，变形和受力均相同，摩擦磨损均匀。

2）圆形滑块与导轨的接触面积要比箱形滑块大，因而磨损小些。

3）圆形滑块与导轨的制造容易保证精度，安装调试方便。

4）圆形滑块的导轨只是一个圆筒，容易紧固。

圆形滑块导轨的缺点是间隙不能调整，磨损后不易修复，只能用在圆形导轨上镶套的办法来解决，比较麻烦；同时，为了保证圆形滑块正常工作，需要在滑块与导轨之间加设一导向平键，以保证不发生相对转动。另外，滑块与导轨间要设有内外防尘罩，以保证滑块与导轨间的清洁。

（3）液压缸

根据摆辗机的结构要求液压缸有柱塞式和活塞式液压缸两种，而活塞式液压缸又分简单液压缸和复合液压缸两种。

（4）机身

摆辗机的机身多采用框架式结构。可分为整体式和组合式两种。整体式机身刚度好，加工装配工作量较少，但需要大型加工设备，加工难度大，运输比较困难。组合式机身由上横梁、下横梁、左右立柱和四根拉紧螺栓等组成。上横梁、下横梁和立柱通过拉紧螺栓组成一个整体。为防止各部分间的相对错移，采用圆形或方形的定位销在水平的两个方面精确定位。组合式机身加工运输都比较方便，大多数摆辗机采用这种结构。

（5）传动系统

螺旋运动的传动方式有以下几种。

1）摆头作匀速旋转，即上模作均匀摆动，下模带动毛坯作等速或变速直线送进运动。这是一种分别传动形式，见图5.5-32a。

这种传动形式结构简单，维修方便，容易实现，国内外摆辗机大部分采用这种传动形式。但这种传动形式机身受交变偏心载荷作用，受力复杂。

2）下模固定不动，上模不仅作均匀摆动，同时又作上下往复送进运动，见图5.5-32b。这种传动形式复杂，但结构比较紧凑，适合小型摆辗机。国内外小型摆辗铆接机大部分采用这种传动形式。

3）通过机械传动或液压马达使下模作旋转运动，而上模则偏一γ角，同时绕轴自转，并作上下往复运动，见图5.5-32c。

4）上模靠毛坯摩擦或机械驱动自转，其轴线固定不动，而下模作螺旋运动，见图5.5-33。该传动形式可以消除由于摆动而产生的交变偏心载荷，机身受力均匀稳定，摆辗件精度高；不需要防转装置，可以摆辗非对称锻件。

由上述传动方式可以看出，摆辗必须有两个运动副，即旋转运动副和直线运动副。这两个运动副可以用同一个能源实现，也可以分别用两个不同的能源来实现。

通过高压液压泵使液压缸送进和液压马达旋转来实现上述两个运动，结构简单，速度可调，是一种较好的传动形式。

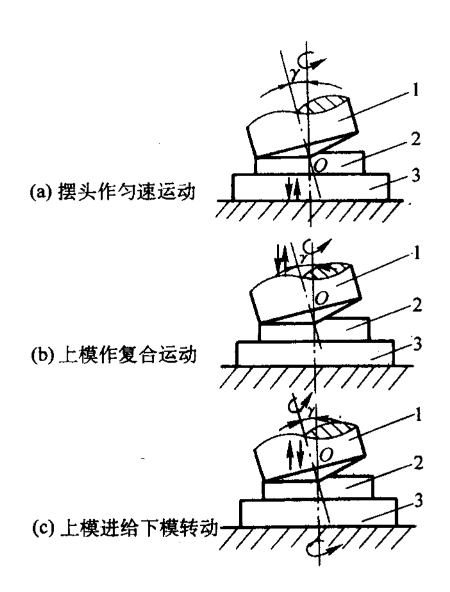


图 5.5-32　传动方式示意图
1—上模；2—毛坯；3—下模

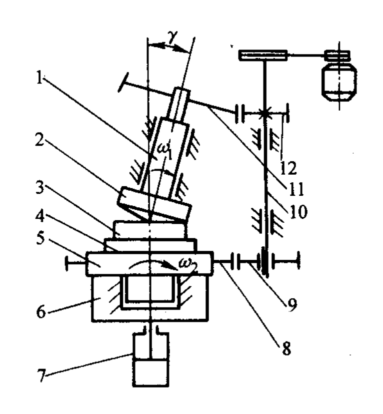


图 5.5-33　下传动方式示意图
1—摆轴；2—上模；3—毛坯；4—下模；
5—工作台；6—滑块；7—送进液压缸；
8、9、11、12—传动齿轮；10—旋转轴

通过电动机带动一系列机械传动系统，使摆轴旋转，滑块直线送进，结构较复杂，困难较多。以上是利用一个能源产生两种运动的传动形式，这两种传动形式目前应用得较少。

国内外大多数摆辗机是采用分别传动的方式来实现的，即用液压或气压传动实现送进运动，用机械传动实现摆动运动。

6　摆辗模具材料

摆辗是特种锻造工艺。相对于锤或压力机锻造，有两点明显地不同：一是毛坯停留在模具中的时间较长；二是模具始终承受交变的偏心载荷。同时，根据摆辗前毛坯是否加热，又分为热摆辗和冷摆辗两种，与此对应的分为热摆辗模具材料和冷摆辗模具材料。

6.1　热摆辗模具材料

热摆辗时，摆辗模具材料应有较好的耐热性、良好的回火稳定性和耐热疲劳性能，使模具不因受热而产生硬度下降和发生塑性变形。同时，还应具有良好的导热性能、淬透性能、冷热加工工艺性能和经济性等。

目前，用于热摆辗工艺的模具材料有 5CrNiMo、5CrMnMo、4Cr5MoSiV（H11）、4Cr5MoSiVI（H13）、3Cr2W8V、MA 金属陶瓷材料及 GH 高温合金等。

（1）5CrNiMo 和 5CrMnMo

5CrNiMo 和 5CrMnMo 是低耐热和高韧性钢，其含碳量在 0.50%～0.60%之间，具有较高的冲击韧度，属典型的锤锻模用钢。5CrMnMo 和 5CrNiMo 钢是我国较早开发的高韧性钢，5CrMnMo 是以 Mn 代替 Ni 而开发的一种替代 5CrNiMo 的钢。5CrMnMo 与 5CrNiMo 相比，强度相近，但塑性、韧性、淬透性和过热敏感性稍差。表 5.5-6 和表 5.5-7 是这两种钢的化学成分和力学性能。

5CrMnMo 和 5CrNiMo 钢的锻造工艺性能、热处理工艺性能和机械加工性能都很好。但强度偏低，模具寿命低，只适合作形状简单的热摆辗模。

（2）4Cr5MoSiV（H11）、4Cr5MoSiVI（H13）

4Cr5MoSiV（H11）、4Cr5MoSiVI（H13），属于中耐热性钢，是我国 20 世纪 70 年代中期引进英国的钢种，其化学成分和力学性能如表 5.5-8 和表 5.5-9 所示。

H13 钢和 H11 钢都是中碳中铬型热作模具钢，因为它的含铬量在 5%左右，也称 5% Cr 型热作模具钢。

表 5.5-6　5CrMnMo 和 5CrNiMo

钢　号	化　学　成　分/%					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
5CrMnMo	0.50～0.60	0.25～0.60	1.20～1.60	0.60～0.90	—	0.15～0.30
5CrNiMo	0.50～0.60	≤0.40	0.50～0.80	0.50～0.80	1.40～1.80	0.15～0.30

表 5.5-7　5CrMnMo 和 5CrNiMo 钢的室温力学性能

钢号	热性能			力学性能			
	淬火温度 /℃	冷制介质	回火温度 /℃	抗拉强度	伸长率 δ/%	断面缩减率 φ/%	冲击韧度 a_K/J·cm^{-2}
5CrNiMo	850	油	500	1 400	9.5	42	3.8
			550	1 370	11.0	44	5.1
			600	1 200	120	49	7.3
5CrMnMo	850	油	500	1 600	10.0	—	2.0
			550	1 440	10.0	10.5	2.7
			600	1 260	10.0	30	4.3



表 5.5-8 H11、H13 钢的化学成分 %

钢号	C	Cr	Mo	Si	V	Mn
4Cr5MoSiV(H_{11})	0.32 ~ 0.42	4.5 ~ 5.5	1.0 ~ 1.5	0.8 ~ 1.2	0.3 ~ 0.5	≤0.4
4Cr5MoSiV1(H_{13})	0.32 ~ 0.42	4.5 ~ 5.5	1.0 ~ 1.5	0.8 ~ 1.2	0.8 ~ 1.2	≤0.4

表 5.5-9 H11、H13 钢的室温力学性能

钢号	热处理规范	硬度/HRC	σ_b/MPa	δ_5/%	φ/%	a_K/J·m^{-2}
H11	1 000℃淬火、580℃回火二次	51	1 745	13.5	45	5.5
H13	1 000℃淬火、580℃回火二次	51	1 830	9	28	1.9

H13 钢的含钒量比 H11 要略高一些，因而在中温下其耐磨性及硬度也要高些。

H11 和 H13 都属于空冷硬化型热作模具钢，不仅淬透性好，而且回火稳定性也高，同时具有较高的中温强度、耐热疲劳性及抗氧化性，也有一定的冲击韧度，因此，很适宜用于制作热摆辗模具。

(3) 3Cr2W8V 钢

3Cr2W8V 是一种广泛用的热作模具钢，属高耐热性钢。成分上含碳量并不高，但含有较高的合金元素，由于其碳和合金元素的含量是高速钢 W18Cr4V 的一半，也称其为半高速钢，表 5.5-10 和表 5.5-11 显示其化学成分和力学性能。

3Cr2W8V 由于含有较多的易形成碳化物的元素 Cr、W，

表 5.5-10 3Cr2W8V 钢的化学成分

元素	C	Cr	W	V	Si	Mn	S	P
含量/%	0.03 ~ 0.04	2.20 ~ 2.70	7.50 ~ 9.00	0.20 ~ 0.50	≤0.35	0.20 ~ 0.40	≤0.03	≤0.03

表 5.5-11 3Cr2W8V 钢的力学性能

试验温度/℃	热处理	硬度	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 σ_5/MPa	延伸率 δ/%	断面减缩率 φ/%
室温	1 080℃淬火、600℃回火	49.5	1 695	1 275	6.8	36
650		114	920	σ_2 = 700	σ_s = 12	46

因此，有较高的高温强度和硬度，具有高的耐磨性，可在 600 ~ 700℃高温下工作。但它的塑性、韧性和抗冷热疲劳性能都低于 5% Cr 的热模钢。

(4) 高温陶瓷 MA

MA 材料是金属相钨（或者添加钼）和陶瓷氧化铝（Al_2O_3）等经烧结压制而成的复合材料，其生产的工艺流程为：粉末配制—混合—成形—烧结—切削加工，再经过一定的工艺处理，将金属相和陶瓷二者的良好性能结合在一起，所以叫高温陶瓷。MA 材料在相当高的温度下仍有合适的硬度，如图 5.5-34 所示。在 900 ~ 1 100℃时能承受大的压应力和交变剪切载荷，并有自润滑性能，在工作时不发生模具与毛坯或工件的粘连。

MA 材料已用于热摆辗碟形弹簧、不锈钢铣刀片、汽车离合器盘毂等零件，显示了使用寿命高、模具性能稳定、经济效益显著等优点。用它制作的模具，每修磨一次可辗压 1 500 ~ 2 500 件。每副模具可修模 5 ~ 6 次，寿命达 10 000 件以上。

MA 材料制备工艺简单，加工性能较好，是一种值得推广的高温热摆辗模具材料。但成效高。因为它较脆，在使用中应防止模具表面受冲击；同时，在使用预应力圈时，还要注意选择合理的过盈量，否则它易开裂。

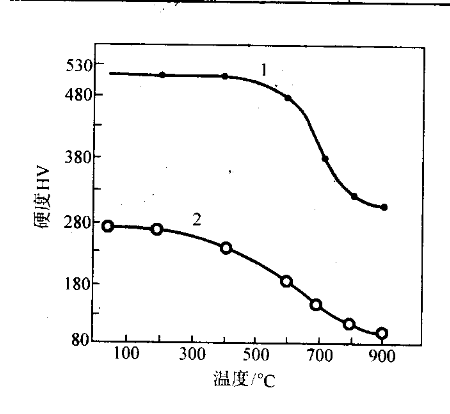


图 5.5-34 MA 高温陶瓷的硬度与温度的关系曲线
1—MA 材料；2—W9Mo3Cr4V

(5) GH135 高温合金

GH135 合金是一种铁基高温合金，它属于奥氏体时效硬化合金，它依靠合金中析出 γ' 相[Ni(Al、Ti)]使合金得到最大程度的强化。GH135 合金的化学成分见表 5.5-12。

图 5.5-35 给出了 GH135 合金等几种材料的高温硬度。从图 5.5-35 可以看出，在 850℃时，GH135 的硬度仍然很高，

表 5.5-12 GH135 合金的化学成分

元素名称	C	Cr	Ni	W	Mo	Al	Ti	B	Cd
含量/%	≤0.06	14 ~ 16	3.3 ~ 3.6	1.7 ~ 2.2	1.7 ~ 2.2	2.0 ~ 2.8	2.1 ~ 2.5	≤0.015	≤0.03

达 320HB；达 1 080℃时布氏硬度仍大于 250HB。

GH135 合金中含 15% 左右的铬，它的氧化膜主要由以 Cr_2O_3 为主的复合氧化物构成，与基体结构牢固、致密，具有良好的抗氧化性能，这样有利于冷热冲击疲劳性能的提高。表 5.5-13 和表 5.5-14 为 GH135 合金冷热疲劳性能及冷热循环对合金性能的影响。



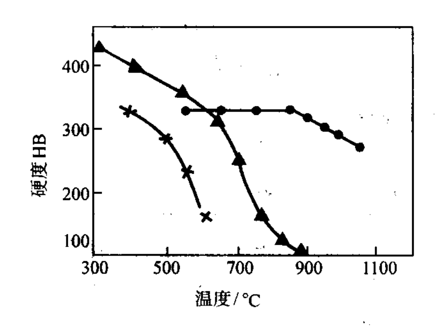


图 5.5-35 几种材料的高温硬度

●GH135 合金 ▲3Cr2W8V ×5CrNiMo

表 5.5-13 GH135 高温合金的冷热疲劳性能

(750℃→20℃吹风冷却)

次数	裂级长度/mm	变形量	风压/MPa
200	0.23	0	0.6
350	0.23~0.30	0	0.6

表 5.5-14 冷热循环对 GH135 高温合金性能的影响

冷热循环次数	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	φ/%
0	750 770	595 594	13.6 14.0	22.5 22.8
100	804 793	653 630	10.4 8.8	18.5 11.6

从表 5.5-13 和表 5.5-14 可以看出，GH135 合金具有良好的冷热疲劳性能，而且经冷热疲劳试验以后，合金的高温强度不但不降低，而且有所提高。这种性能对于在冷热循环下工作的热摆辗模具是非常合适的。但 GH135 高温合金价格较贵，一般只用它作模具镶块。

6.2 冷摆辗模具材料

钢在冷摆辗成形时的变形抗力较大，模具工作部分将承受很大的应力并受到剧烈的摩擦，所以模具应具有高的强度、硬度和耐磨性。同时，摆辗工艺的不均匀受力以及应力的频繁循环，模具应具有高的冲击韧度和疲劳强度。为了保持模具工作部分的尺寸精度和不发生塑性变形，摆辗模具应具有足够高的屈服强度。

冷摆辗模具寿命一般比热摆辗模具寿命长，摆辗各种齿轮和非回转体法兰零件时，模具寿命为 1 000~5 000 件，有的可达 10 000 级以上。

冷摆辗模具材料目前主要采用下列几种：GCr15 轴承钢、Cr12 型钢、高速钢（钨钼系）、高合金改型基体钢和高强韧低合金冷作模具钢等。

(1) GCr15

GCr15 属冷作模具钢的高碳低合金钢，化学成分见表 5.5-15，GCr15 由于其合金元素含量少，相对而言，其耐磨性稍差。

表 5.5-15 GCr15 的化学成分

元素成分	C	Mn	Si	Cr
含量/%	0.95~1.10	≤0.04	≤0.04	1.30~1.65

用 GCr15 钢做端面齿轮摆辗成形模，寿命为 1 000~1 500件。因此，对形状不复杂、批量小的工件其冷摆辗成形模可采用 GCr15。

(2) Cr12 型钢

Cr12 是高耐磨的冷作模具钢，我国用其作摆辗模具的时间较长。由于其较脆，应用范围较窄，但它有热处理变形小、耐磨性好的特点，非常适合用作冷作模具。

我国应用的 Cr12 型模具钢主要有 3 种，见表 5.5-16。

表 5.5-16 Cr12 型模具钢的化学成分 %

钢件	C	Cr	Mo	V	Si	Mn
Cr12	2.00~2.30	11.50~13.00	—	—	≤0.35	≤0.35
Cr12Mo	1.45~1.70	11.00~12.50	0.40~0.60		≤0.35	≤0.35
Cr12MoV	1.45~1.70	11.00~12.50	0.40~0.60	0.15~0.30	≤0.36	≤0.35

Cr12 型钢属于莱氏体钢，室温时，其退火组织中，除了有含铬的 α-Fe 外，还有合金碳化物 $(CrFe)_7C_3$。而对于 Cr12 钢来说，则还存在 $(FeC_3)_3C$。$(CrFe)_7C_3$ 型铬碳化合物具有极高的硬度，可达 1820HV，因此 Cr12 钢的耐磨性稍优于 Cr12Mo 及 Cr12MoV 钢。但 Cr12 钢的碳化物分布均匀性要比后面两种钢严重，因而韧性、强度性能有所降低。而 Cr12MoV 钢的综合性能优于 Cr12，应用普遍。冷摆辗模用 Cr12MoV 较多，齿轮冷摆辗模寿命约 2 000~5 000 件。

(3) 高速钢

用作模具的高速钢有 W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2 和 6W6Mo5Cr4V，其成分见表 5.5-17。

W18Cr4V 钢是钨系高速钢的典型钢种，在冷摆辗模中主要是应用它强度高、热硬性好和耐磨性高的性能特点，但其韧性较低，易发生断裂。因此，多用其作镶块。

表 5.5-17 几种高速钢的化学成分 %

钢种	C	Mn	Si	Cr	W	V	Mo
W18Cr4V	0.70~0.80	≤0.40	≤0.40	3.80~4.40	17.50~19.00	1.00~1.40	
W6Mo5Cr4V2	0.80~0.90	≤0.40	≤0.40	3.80~4.30	5.55~6.75	1.75~2.20	4.50~5.50
6W6Mo5Cr4V	0.55~0.65	≤0.60	≤0.40	3.70~4.30	6.00~7.00	0.70~1.10	4.5~5.50

W6Mo5Cr4V2（代号 M2 钢）钢是在钨系高速钢的基础上，以钼代替部分钨而发展起来的钨钼系高速钢，与 W18Cr4V 相比，同规格的 W6Mo5Cr4V2 钢的碳化物不均匀性要低 1~2 级，其淬火、回火后钢的强度和韧性比 W18Cr4V 高，但热硬性稍低。W6Mo5Cr4V2 的价格便宜，机械加工容易，在冷摆辗模具中应用广泛。

6W6Mo5Cr4V（代号为 H42）属低碳高速钢，与 W6Mo5Cr4V2 钢相比，含碳和含钒量都要低些。6W6Mo5Cr4V 钢经淬火回火后，可以得到比 W18Cr4V 钢和 W6Mo5Cr4V2 钢都要高的强度和韧性。其抗弯强度可达 4 700 MPa，无缺口冲击韧度达



50～60 J/cm²，硬度在 40～43HRC，很适合制造冷摆辗模具。

（4）高合金改型基体钢 LD 钢。

LD 钢是 7Cr7Mo3V2Si 钢的代号，它是一种高碳高铬不含钨的高合金钢，其化学成分见表 5.5-18。

表 5.5-18 LD 钢（7Cr7Mo3V2Si）的化学成分

元素	C	Cr	Mo	V	Si	Mn	S	P
含量/%	0.70～0.80	6.50～7.50	2.0～3.0	1.7～2.2	0.70～1.30	≤0.50	≤0.03	≤0.03

LD 钢的强度、硬度及淬透性都很好，因其含有高的钼、钒成分，提高了二次硬化能力，进一步改善了强韧度与淬透性。钢中含有一定的硅能提高变形抗力、冲击韧度、抗疲劳性，具有良好的综合性能。LD 钢的力学性能见表 5.5-19。

表 5.5-19 LD 钢不同状态下的力学性能

热处理工艺	冲击韧度 α_K/J·cm^{-2}	硬度 HRC	抗压屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	抗弯强度 σ_{bb}/MPa	挠度 δ/mm
1 100℃淬火、550℃×1h3 次回火	116	61	2 550	5 430	16.5
1 100℃淬火、570℃×1h3 次回火	104	60	2 340	4 990	16.5
1 150℃淬火、550℃×1h3 次回火	98	62	2 860	5 590	12.7
1 150℃淬火、570℃×1h3 次回火	104	61	2 660	5 190	8.3

由表 5.5-19 可以看出，LD 钢的抗弯强度大约为 Cr12MoV 钢的 2 倍多，冲击韧度为 Cr12MoV 的 3～4 倍。

另外，LD 钢的碳化物呈细小点状分布，且碳化物的不均匀度小，因此，其具有高的强韧性，它非常适合作冷摆辗模具。

（5）高强韧低合金模具钢 GD 钢

GD 钢是 6CrNiMnSiMoV 钢的简称，该钢种合金元素很低，仅为 4%，具体成分见表 5.5-20。

GD 钢的碳化物细小均匀，强度和韧性高，明显优于 Cr12 型钢，参见表 5.5-21。

表 5.5-20 6CrNiMnSiMoV（GD）钢的化学成分

元素	C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	V
含量/%	0.64～0.74	1.0～1.3	0.7～1.0	0.6～1.0	0.5～0.9	0.3～0.6	适量

表 5.5-21 GD 钢与 Cr12MoV 钢

钢号	冲击韧度 α_K/J·cm^{-2}	断裂韧度/MPa·mm$^{1/2}$	抗弯强度 $\sigma_{0.2b}$/MPa	抗压强度 $\sigma_{0.2c}$/MPa
GD	128.5	25.4	—	—
Cr12MoV	44.2	16.6	—	—

GD 钢的工艺性能好，淬火温度低，变形小，即使出现裂纹，扩展也很慢，这是其他模具钢不能比的。因此 GD 钢特别适合于以崩刃和碎裂失效为主要失效形式的冷摆辗成形模具。

7 典型零件的摆辗工艺

7.1 冷摆辗成形件

摆动辗压是连续局部成形工艺，同时摆头与毛坯主要受滚动摩擦作用，因此，摆动辗压成形时总的变形力小，许多工件都可以实现冷摆辗。

冷摆辗不需要加热坯料，摆辗成形件的热胀冷缩量小，因而可以直接得到尺寸、形状精度高的产品，实现净形或近似净形加工。同时，由于冷塑性变形引起应变强化，强度、硬度、耐磨性和疲劳性能都能得到大幅度提高。

冷摆辗成形的工艺过程与冷挤压相似，毛坯一般要求使用冷拔或冷轧钢，要进行退火，要进行磷化、皂化。

（1）扬声器导磁体

导磁体（又名铁心、"T" 铁）是扬声器的主要零件，其形状如图 5.5-36 所示。

导磁体属于带法兰的长轴类锻件，而且是回转体、薄法兰盘。该件尺寸精度要求高，形位公差要求也很严格，摆辗后不再机械加工，因此只有采用冷摆辗成形。

导磁体冷摆工艺流程为：备料—制坯—退火—撞光—磷皂化处理—摆辗成形。

备料主要内容是原材料及形状的选择与确定。

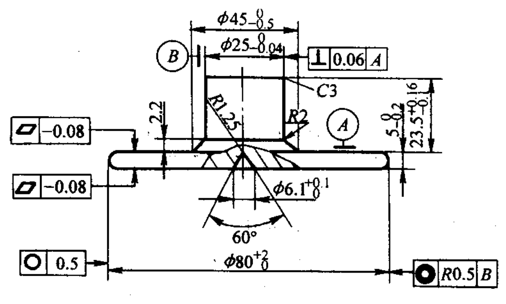


图 5.5-36 扬声器导磁体

根据零件的使用性能要求和冷摆辗工艺特征，通常选 Q235 钢或 10 钢。

毛坯形状的不同，导致制坯工序的不同以及工序数量不同，同时引起力的大小不同，也影响模具寿命及成本。

图 5.5-36 的工件，合理的毛坯为 ϕ24.9 mm×89 mm。这种毛坯形状简单，只要切断即可；同时，毛坯直径比圆柱直径略小，能顺利地将毛坯放入凹模，定位准确。这种毛坯与凹模孔摩擦极小，模具寿命高。

为了保证工件精度，一般都采用冷拔钢材，用车床下料。

摆辗前是否需要制坯，要根据变形部分尺寸而定。如果毛坯部分的高径比 $H_0/D_0 \leqslant 1.5$，则不需制坯；当毛坯变形部分高径比大于 1.8 时，就必须预先制坯，否则毛坯容易变曲。同时也保证不了法兰和轴的同轴度要求，另外，一次变形量过大后，辗压件易产生裂纹。



预制坯形状一般采用蘑菇头形，如图 5.5-37。每次变形程度 $\varepsilon \leqslant 80\%$。两面相交处要用圆弧自然连接。

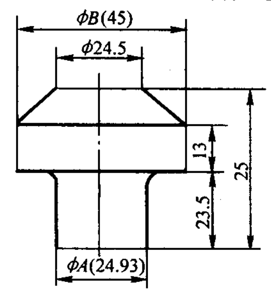


图 5.5-37 扬声器导体摆辗预制坯形状

成形预制坯可以在同一台摆辗机上进行，也可以在专用压力机上进行。

经冷拔后的钢，硬度较高，如 10 钢，约为 187HB。为了增加塑性，利于成形充满，减少变形力，增加模具寿命，保证摆辗产品质量，摆辗工序前对毛坯要进行软化退火，降低变形抗力，并使其硬度降到 90～110HB 以内。

退火后通过撞光或化学处理将氧化皮清除掉。

为了减少成形中的摩擦和成形力，提高模具寿命和产品质量，对于已经清理过的毛坯在摆辗成形前需进行润滑处理。润滑处理包括磷化和皂化处理，其流程为：

除油—冷水洗—热水洗—磷化—水洗—皂化—烘干。

摆辗成形力可按式（5.5-10）计算。

导磁体的模具材料可选轴承钢、G12 型钢、高速钢和高合金改型基体钢等。鉴于导磁体工件是很简单的回转体，但有 $\phi25_{-0.04}^{\ 0}$ 的尺寸要求，同时批量大（年产百万件），因此要求模具材料具有好的耐磨和抗疲劳性能，选用 Cr12MoV 比较合理。Cr12MoV 属于高碳、高铬、高耐磨钢，且热处理变形小。

导磁体的模具结构宜采用组合结构，如图 5.5-38 所示为其下模结构。组合模采用冷装和热装均可。上模可设计成整体的，也可设计成组合式。如工件的上表面为一平面，凸模可设计成整体的。

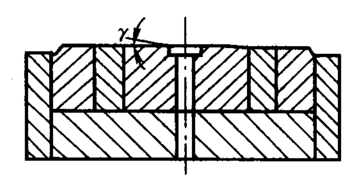


图 5.5-38 组合模结构

采用冷摆辗生产导磁体是一种先进生产工艺。与铆接法相比，具有材料利用率高、产品性能好（不漏磁）、精度高、生产效率高的优点；与冷镦法相比，具有节约投资、节约能源等优点。

(2) 摩托车启动齿轮

摩托车启动齿轮零件如图 5.5-39 所示。该零件的材料为 15CrMo 或 20CrMo。该零件在端面凸台外环沿圆周有 30 个等分的齿，齿的深度为 0.9 mm ± 0.1 mm，齿顶和齿底圆角为 R0.2～0.4 mm。因凸台与外环齿形之间无退刀槽，所以无法对齿面齿形进行切削加工。传统的工艺采用冷镦挤压齿形工艺生产，但需较大的设备，且材料利用率低。后改用冷摆辗工艺，采用 1 000 kN 或 1 600 kN 的摆辗机生产。

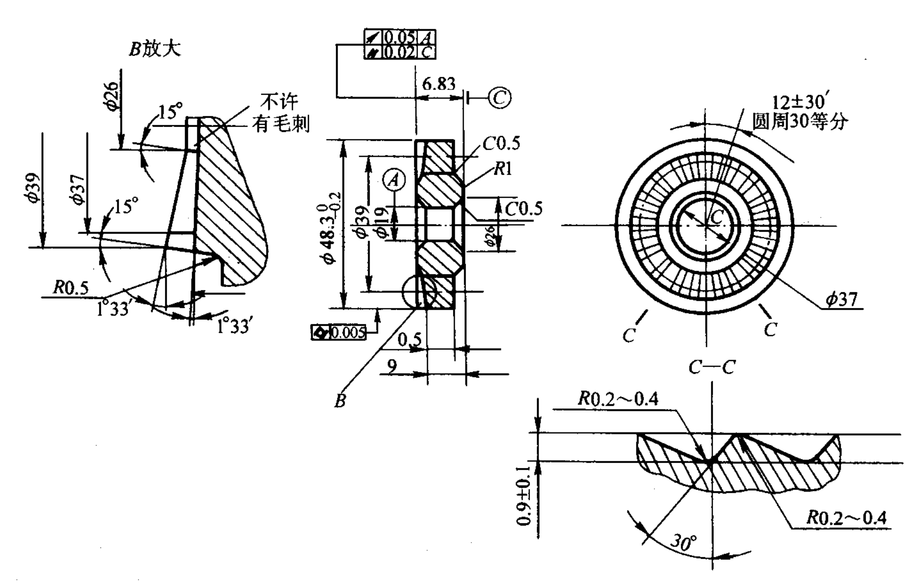


图 5.5-39 摩托车启动齿轮

该零件的生产工序为：

下料（车削）—清洗—磷化、皂化—摆辗成形。

该零件的摆辗成形模结构如图 5.5-40 所示。制作齿形芯块的材料可采用高速钢 W18Cr4V 或 W6Mo5Cr4V2。

(3) 汽车 VE 泵端面凸轮

汽车 VE 泵端面凸轮，是柴油机燃油喷射泵的关键零件，如图 5.5-41 所示。凸轮升程 2～3 mm，升程面为高次组合曲面，升程面与回程面不是对称关系，它对油泵的耗油量和工作效率影响极大，所以要求高，升程公差为 ±0.02 mm。由于端面凸轮的加工难度大，虽然有采用热精锻方法，有采用中间退火多次冷镦挤成形的，也有采用温锻成形，但采用冷摆辗最合理。目前已成熟地应用于生产。

端面凸轮的材料为 20CrMo，渗碳淬火后硬度 58～64HRC。

端面凸轮的摆辗生产工艺为：

下料—清洗—磷化—皂化—摆辗成形。

下料采用车床或辗锯床下料。尺寸通过试验确定。

端面凸轮摆辗成形模具如图 5.5-42 所示。

端面凸轮的模具材料选用 Cr12MoV 钢或 W6Mo5Cr4V2，热处理硬度取 56～58HRC。

(4) 直齿行星锥齿轮

直齿锥齿轮在机械制造中应用广泛。传统的锥齿轮加工方法是采用金属切削加工工艺，使用专门的切齿机床对每一个齿逐一加工。现在较先进的工艺是精密模锻和冷摆辗。冷摆辗与模锻相比，力小，工序少，能量消耗小。

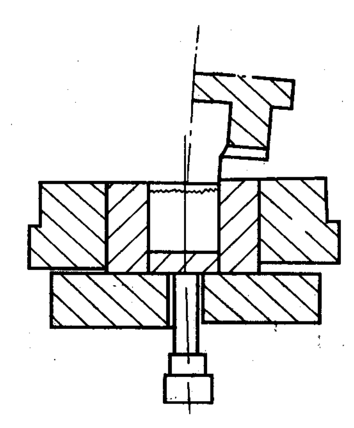


图 5.5-40 摩托车启动齿轮摆辗成形模

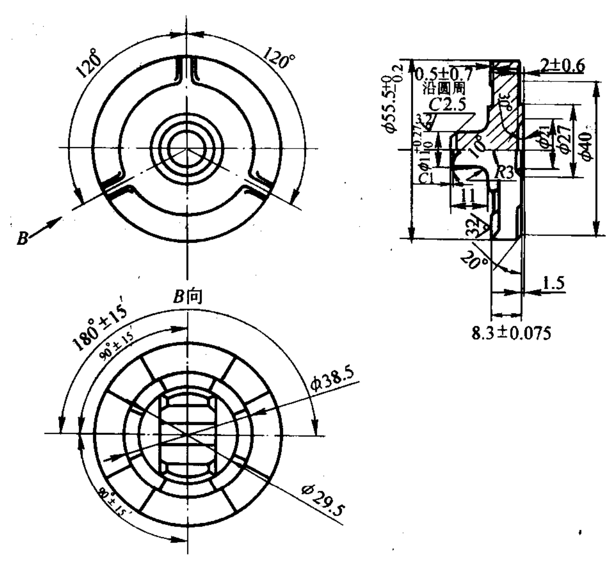


图 5.5-41 汽车 VE 泵端凸轮

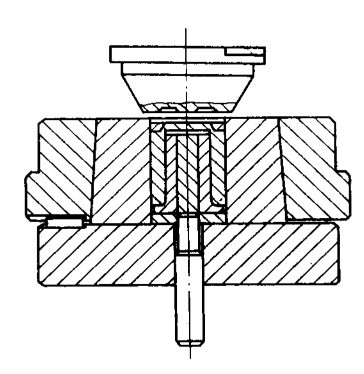


图 5.5-42 端面凸轮摆辗成形模具

NJ130 型汽车行星锥齿轮如图 5.5-43 所示，材料为 20CrMnTi。

直齿行星锥齿轮的工艺为：

下料—清洗—磷化、皂化—摆辗成形。

直齿行星锥齿轮冷摆辗模具的材料选 Cr12MoV，热处理硬度取 56 ~ 58HRC。

7.2 温、热摆辗成形件

温、热摆辗成形的优点是成形力小，毛坯塑性好，能实现较大的变形。虽然热摆辗需加热毛坯，存在氧化、摆辗件表面粗糙、尺寸精度低、后续机加工量增大等缺点，但对于

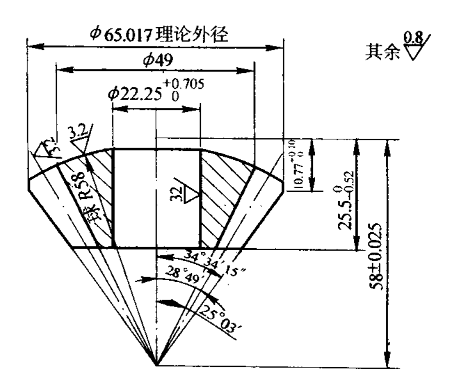
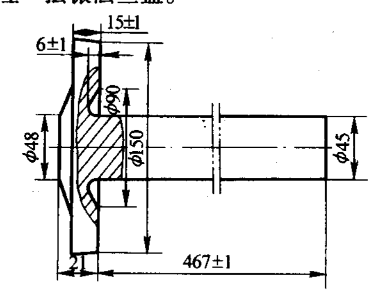


图 5.5-43 NJ130 型汽车行星锥齿轮

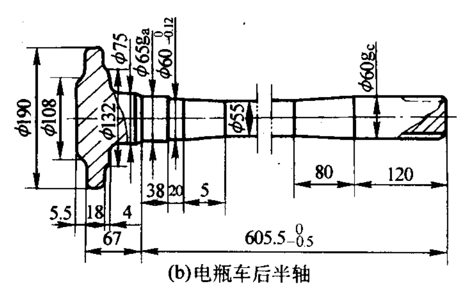
大尺寸的工件，冷摆辗的力不够，采用温、热摆辗就是最合适的。

（1）汽车、拖拉机、电瓶车后半轴

汽车、拖拉机、电瓶车后半轴，属于需局部镦粗的长杆类典型件。见图 5.5-44。这类工件老工艺采用大吨位的平锻机才能生产，但投资大，浪费能源。现在多采用在其他设备上制坯，在卧式摆辗机上成形的工艺方案，其工艺为：下料—加热—制坯—摆辗法兰盘。



(a) 35 马力拖拉机后半轴



(b)电瓶车后半轴

图 5.5-44 半轴简图

这类工件的毛坯下料在锯床上进行，根据制坯方法的不同选择合适的原材料的长度和直径。下料后，要去除棒料上的氧化皮及其他缺陷，并在校直机上将棒料校直。

加热方式可视工厂生产条件而定。可采用火焰加热，也可采用感应局部加热。

制坯方法有以下几种。

1）电热镦制坯。电热镦粗是一种先进的制坯工艺，它是利用电流通过坯料直接加热，可同时进行镦粗。因为加热和镦粗均是局部连续进行的，毛坯镦粗长度不受限制，变形部分的长径比可远远大于 3，这一点是其他锻造设备无法比拟的。它的优点在于无振动、无噪声、氧化少，并且容易实现机械化与自动化，但其电参数较难控制，易出现过烧和弯曲等缺陷。

2）在 750 kg 空气锤上制坯。这种方法是锤砧上加工一个圆长孔，制坯时把长杆毛坯插入锤砧上长孔中，再用套筒胎模把露出部分锻打成倒锥形。这种制坯工艺虽然落后，劳动强度大，但其设备简单，易于实现。



3）液压机制坯。液压机制坯与锤上制坯的方法相似，但是与锤上制坯相比，它无噪声，无振动，劳动条件好。液压机的公称力要大于1 000 kN。

4）轧机制坯。利用80型三辊仿形轧机将$\phi70\sim90$ mm圆棒料轧制$\phi50$的杆部和$\phi60$的花键部分，然后摆辗大头使其成为半轴的法兰。此法生产率高，质量好，但设备投资大。

5）精锻机（径向锻造机）制坯。这种制坯方法是使原材料的部分直径减小。它可加工直径大于半轴杆部的各种原材料，对原材料的直径无严格要求。但精锻机费用高。

制坯方法必须根据原材料尺寸和工厂现有设备的条件而定。制坯后的形状应充分考虑摆辗变形特征。

法兰盘摆辗成形采用卧式摆辗机。

半轴摆辗模具由三部分组成，即固定凹模、活动凹模和摆动凸模，如图5.5-17。

半轴毛坯材料多采用40Cr。

半轴的摆辗模具材料采用5CrNiMo、3Cr2W8V、5CrMnMo。

（2）碟形弹簧、减速机摆线轮等薄环、盘形工件

碟形弹簧是一种刚度大的弹性元件，即在变形很小的情况下能承受很大的载荷。且缓冲吸振能力强，适用于轴向空间要求紧凑的地方。碟形弹簧的形状如图5.5-45所示。

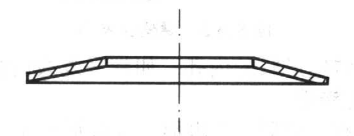
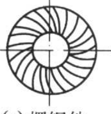
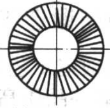


图5.5-45　碟形弹簧

碟簧属于薄环形类工件，过去除特大特厚的采用自由锻制坯外，其余均采用冲压制坯，现在已大部分采用摆辗制坯。碟簧工作时受拉应力最大处是下底面边缘部位，拉应力沿圆的切线方向。摆辗得到的金属流线成螺旋线形分布，且与最大拉应力成一定角度，如图5.5-46所示。因此，其承载能力最强，疲劳寿命高。



(a) 摆辗件



(b) 冲压件　(c) 锻造件

图5.5-46　碟簧的金属流线

采用摆辗法制造碟簧，有如下优点。

下料—加热—摆辗—冲孔。

下料在冲床下兰脆下料。首先将棒料加热到500℃，然后在冲床上剪切。下料长径比取1.4～1.7。

加热采用室式火焰炉或电阻炉加热，若有条件应采用感应加热。室式炉每炉装料300件左右。若装料过多，加热时间过长，氧化、烧损高，造成体积不够。

50CrVA弹簧钢的始锻温度1 100～1 160℃，终锻温度850～900℃。

摆辗可采用1 000～2 000 kN的立式摆辗机，摆角为3°。由于碟簧毛坯只是一个厚约5 mm左右的圆片，形状简单，所以模具也简单，上模是一个顶角为174°的圆锥体，下模是一平面。模具材料采用5CrNiMo时，寿命约为2 000件。若采用MA陶瓷材料制作模具，寿命为10 000～20 000件。但MA陶瓷材料的模具使用前要预热到350℃以上。在辗压过程中，如停顿或间隙时间较长时，要保温在350℃以上，否则再摆辗时容易破碎。

摆辗时每转压下量大约为4 mm，每秒摆辗的压下量为10～15 mm。辗压$\phi80$ mm的毛坯，纯辗压时间为4 s，全部时间共6 s，每分钟可摆辗10件。

工件高度可以通过控制摆辗时间或机械限位装置来保证，公差为－0.4 mm。

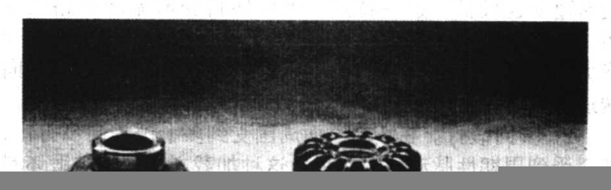
为了保证工件的尺寸精度，摆辗后的中间坯立即传到1 600 kN冲床上进行冲孔和切边。如$\phi70$ mm碟簧，辗后尺寸为$\phi75\times6_{-0.64}^{\ 0}$，冲裁后外径为$\phi72\pm0.5$，内径为$\phi28\pm0.5$，厚度为$6_{-0.64}^{\ 0}$，平面度为0.3 mm。

减速机摆线轮也是一种平面薄圆环，所用材料为GCr15，工件重0.52 kg。摆辗温度850～1 050℃，其生产工艺与碟簧相同。

其他类似工件如管道平法兰、空压机阀片、阀盖等，也可以用碟簧片类似的温、热摆辗工艺生产。

除了上述典型件外，我国还用摆辗工艺生产摩托车单向器飞块、高速钢锯片铣刀、碗形直齿插刀坯和车辆勾舌销等。

武汉理工大学不仅采用冷摆辗精密成形技术成功地生产出了从动螺旋锥齿轮、微型车半轴锥齿轮、轿车行星、轿车半轴齿轮（图5.5-47），同时研制出了比较大的模数（$m=6$ mm）的齿轮冷精密摆辗工艺。



第6章 径向锻造

径向锻造工艺是进行轴类件锻造的新工艺，这项工艺至今仅有50多年的历史，但它具有锻件质量好、生产效率高、机床自动化程度高和原材料消耗低，工装简单且通用性强等优点，所以发展很快。

1 径向锻造的工艺原理、用途和优缺点

1.1 径向锻造的工艺原理

径向锻造工艺的原理，如图5.6-1所示。轴类锻件在径向锻造机上成形是由四个基本运动配合进行的。

①多锤头（三个或三个以上的锤头）在垂直于坯料（一般为轴类或管类件）轴线的平面上运动，对锻件同步打击，使坯料产生塑性变形。

②锻件在夹爪夹持下，绕本身轴线旋转的同时，作轴向运动。

③为了锻出不同直径的台阶轴或锥形轴或管，锤头必须作径向进给运动，锤头的闭合直径要发生变化。

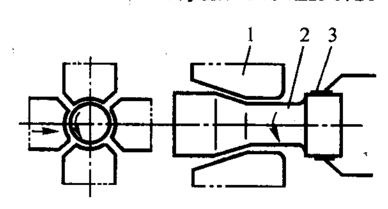


图5.6-1 径向锻造工艺的原理
1—锤头；2—坯料；3—夹爪

径向锻造工艺是在坯料周围对称分布多个（一般为3～4个，也有2个，多到8个）锤头，对着被锻坯料的轴线进行高频率同步锻打，坯料边旋转边作轴向送进，使坯料在多头螺旋式延伸变形情况下拔长变细。径向锻造工艺具有两个基本特征。

1）高频率的脉冲锻打。每锻打一锤的坯料变形量较小，变形速度也较低。这一特点，可使坯料变形流动的路径变短，摩擦阻力小，变形容易。因此，可以大大减少所需的变形力和变形功。由于单位时间内，坯料受到锻打次数和轴向送进次数多，生产率较高。

2）多向锻打。在坯料截面周围受到多个锤头同步打击，坯料受到周期性脉动外力作用。这种加载方式，使被锻坯料截面处于三向压应力状态，有利于提高金属的塑性。一般对低塑性金属脉动加载要比连续加载时金属塑性提高2.5～3倍。径向锻造工艺不仅适用于一般钢材的锻造，而且也适用于锻造高强度、低塑性的高合金钢，尤其适用于难熔金属，如钨、钼、铌、钛、镁等及其合金的开坯和锻造。它不同于在一般锻锤、压力机或轧机上的金属变形，如轧制时坯料轧薄，在产生轴向延伸变形的同时还有展宽。

径向锻造时，如坯料只旋转，则得到台阶轴或锥形轴（或管）类件；当坯料不旋转而只作轴向移动时，则得到对应于锤头数的多边形截面的型材；当锤头数在三个以上而筒状坯料边旋转边作轴向移动，在筒坯内又置有芯棒时，可得内花键、内螺纹、来复线等空心轴件。

1.2 径向锻造工艺的用途

径向锻造工艺应用范围较广，通过径向锻造可获得不同形状的轴类和管类零件。

1）大直径长回转体的台阶轴、锥形轴，如机床、汽车、拖拉机、机车、飞机、坦克、石油钻铤、火车车轴及其他机械上的实心轴和锥形轴（图5.6-2）。小直径轴和短轴可以由楔形模横轧机或普通锻压设备生产。国内使用的径向锻造机可锻坯料最大直径为ϕ250 mm，最长达6 m；世界上已有可锻最大直径为ϕ900 mm，最长达10 m坯料的径向锻造机。

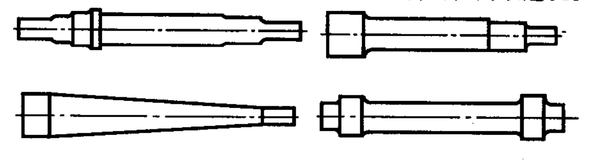


图5.6-2 轴类零件

2）薄壁管形件的缩口、缩径（图5.6-3），如各种汽车桥管、各种高压储气瓶、炮弹、无缝管轧机穿孔水冷顶头的缩口，航空用球形储气罐、火箭用喷管的缩径等。

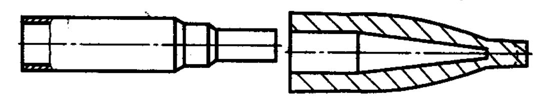


图5.6-3 薄壁类零件

3）带有特定形状的内孔，如带来复线的枪管、炮管和深螺母、内花键等。

4）异型材，矩形、六边形、八边形和十二边形等多边形棒材生产；内六方管、三棱刺刀等各种截面形状零件。

径向锻造工艺不仅可锻一般碳钢、合金钢、工具钢、铜合金、铝合金和镁合金，尤为适用于低塑性、高强度的难熔金属，如钨、钼、铌、锆、钛及其高合金、特殊钢的开坯和锻造。可以以钢锭为原料，将其锻成圆棒料、方棒料、矩形棒料、各种形状的轴，也可以锻造塑性很差的白口铸铁、粉末烧结锭等。径向锻造工艺既可热锻，又可以进行温锻和冷锻，达到少无切削加工。

1.3 径向锻造工艺的优缺点

径向锻造工艺具有如下优点。

1）锻件品质高

① 精度。热锻直径100 mm的轴坯，外径尺寸公差可达±0.3 mm，内径（采用芯棒成形）尺寸公差可达±0.1 mm。

② 表面粗糙度。冷锻表面粗糙度外径可达R_a = 3.2～0.4 μm。

③ 力学性能。径向锻造工艺固然表面变形大于心部变形，但是对一般的实心轴坯或者高合金钢锭的开坯，只要达到足够的锻造比，心部可以锻透。例如ϕ115 mm，45钢的锻造比达到2.5时，心部即可锻透。而ϕ80 mm的钼锭，当锻造比达到2.6时，心部也可以成为锻造组织。径向锻造工艺所生产的空心轴与棒料进行机械加工生产的空心轴相比，在内孔和外径的台阶过渡处，具有理想的金属纤维流向（见图5.6-4）。

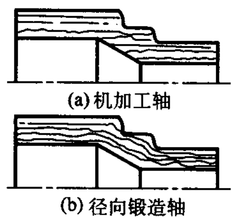


图5.6-4 不同工艺空心轴的纤维



④ 外观。径向锻造工艺所锻锻件外观与其他锻造工艺所锻锻件相比，很少有其他锻件常见的弊病，如夹层、锤痕不均、台阶不清晰、不整齐等。

2）生产率高。由于径向锻造机的打击频率高，锻打过程为自动控制，工步间不间断，锻打过程中又不使用任何其他附加工具，不必进行工步测量，所以生产率高。例如将 ϕ110 mm × 690 mm（质量 52 kg）的圆钢锻成六个台阶的 C620－1普通车床主轴。机动时间仅为 52～54 s；锻造 C620－1的Ⅳ轴（最大直径 55 mm，长 400 mm，两个台阶），生产率可达 150 件/h。一台 3 400 kN 精锻机年产量可达 1.6 万吨，相当于3台2 t气锤的总产量，工人从72人减为24人（三班作业），节约劳动力 66.7%，一台 10 000 kN 精锻机的年产量为 2.5 万吨，相当于3台5 t气锤，节约劳动力 50%。

3）材料消耗低。由于径向锻造工艺所锻锻件的精度高，加工余量小，可显著节约原材料。热锻件可大大减少粗加工工时，冷锻件可以不经过切削或经过少量切削加工后直接应用。与自由锻锻件相比，一般锻造实心台阶轴可节约钢材 10%～20%，锻造空心台阶轴可节约钢材 30%～50%。

4）工艺装备少而简单、通用性强、制造周期短。如一台 1 600 kN 立式径向锻造机的一副锤头（4个）质量仅 40～50 kg，且形状简单，容易制造。同时，每副锤头还可以用于锻打在其尺寸范围内的多种轴，而用模锻生产，一模只能锻一种锻件。

5）径向锻造机自动化程度高，劳动条件好。径向锻造机已应用数控技术，全部工作过程都是程序自动控制，便于实现机械化、自动化生产。操作工人的工作只需要按电钮，基本消除了繁重的体力劳动。工人技术等级要求不高。一般径向锻造机有自动过载保护装置，在设备超负荷时，能自动退锤停止打击，不至于损坏任何零件，并可自动复位，继续锻打。径向锻造机的打击力自身平衡，基础振动不大，对地基和厂房无特殊要求。工作时没有巨大的噪声和振动，氧化皮、烟尘可从机床下部排出，工人劳动条件好。

径向锻造工艺的缺点如下。

1）径向锻造机的结构复杂，造价高。维修保养较其他锻压设备复杂。

2）虽然这种工艺的应用范围较广，但适应性小，每台径向锻造机对锻造坯料的最佳直径和尺寸都有一定要求，工艺万能性差。

3）径向锻造机是专用性设备，只适用于成批生产。单件小批生产时不宜采用。

4）径向锻造工艺所生产的锻件尾部有料头，必须切掉后才能进行机械加工。切头工序与模锻件的切边工序相比，生产率低。

5）径向锻造工艺所生产的锻件多是细长杆类件，加工余量小，锻后摆放、搬运过程中和热处理时容易变形。对锻后热处理和校直等工序的要求较高。

6）如果坯料冶金品质差，径向锻造锻合坯料芯部缺陷的能力较锻锤差。

2 径向锻造设备

2.1 径向锻造机的分类

随着径向锻造工艺范围的不断扩大，相应的径向锻造机类型也在增加。

（1）按适用范围

1）专用于锻造各种实心轴类的台阶轴或锥形轴零件。其结构的主要特点是没有芯棒机构。锻空心管类零件只能自由缩径。

2）除用于锻造各种实心台阶轴或锥形轴零件外，还可锻造圆孔和一定形状内孔的零件。结构特点是有芯棒机构。

（2）按照坯料送进方向分类

1）立式径向锻造机。坯料沿着竖直方向送进，锤头在水平方向对坯料进行打击。这类径向锻造机的吨位小，占地面积也小，但机器高度尺寸较大。由于受高度尺寸的限制，只适于锻造较短的轴类零件，一般可锻工件长度为 1 m 左右。立式径向锻造机的优点是占地面积小，有利于工件的进给，工件锻后不易弯曲，热锻时氧化皮容易清除，机器结构紧凑。

2）卧式径向锻造机。坯料沿着水平方向进给，锤头垂直于水平方向对坯料进行打击。这类径向锻造机的高度尺寸小，不需要厂房，容易实现自动上下料。设备维修方便。适用于锻造长轴类锻件，主要缺点是锻造长轴的大型卧式径向锻造机必须增设托料机构和工件导向装置等，因而结构比较复杂，占地面积较大。

（3）按锤头的数量

径向锻造机的锤头在坯料周围对称分布。一般为 3～4 个，多到8个，也有2个的。有几个锤头的径向锻造机就称作几锤头径向锻造机，有2个锤头的也称作双锤头径向锻造机。

日本石川岛播磨重工业公司就研制了一种带砧块库和砧块自动更换装置的 CNC 双锤头径向锻造机，并且以其为主机研制成功了轴类零件的柔化锻造中心。该机的主要技术规格如下：公称压力 2 000 kN，往复行程 40 mm×2，调节行程 250 mm×2，行程次数 80～160 次/min。该机配有两台 200 kg 操作能力的电子计算机控制的锻造操作机，一台进行上料，一台进行下料。这两台操作机可同主体一起用程序控制，加上输送带、上料装置、下料装置、冷却台，就组成了轴类零件的柔性锻造加工中心。该锻造加工中心用一台主电子计算机控制，只要将原始坯料的形状、尺寸、材质等数据输入电子计算机，同时输入所需锻制制件的形状、尺寸，电子计算机就可完成下述控制：①自动编制锻造程序；②控制锻机的试运转；③控制双锤头径向锻造机按编制的程序自动运转锻造；④自动记录有关工艺参数。

2.2 径向锻造机的构造

径向锻造机由锻机本体，液压系统，电器控制系统及辅助系统所组成。径向锻造机工作时，工件一面旋转，一面作纵向运动，锤头还要作径向打击。在锤头打击工件的瞬间，锤头将工件抱住，工件若继续旋转时，会使工件扭曲。为了解决此问题，在机器上装有“弹簧缓冲器”或“多频率制动器”，当工件被“抱住”瞬间，夹头旋转压缩弹簧或多频率制动器瞬间制动而使工件停止转动。锤头松开后，工件以高于正常转速转动，以弥补锻件被锤头抱住的一瞬间所滞后的角度。多频率制动器的制动次数与锤头打击次数相同，锤头打击锻件的瞬间，多频率制动器同步制动。因此夹头不是匀速转动，而是在转动过程中产生有规律的抖动。

（1）立式径向锻造机

图 5.6-5 为 D3—80 型立式径向锻造机工作原理图。径向锻造机本体自下而上，可分为三层：Ⅰ—传动箱，Ⅱ—锻造箱，Ⅲ—床身。径向锻造机锻造时，主要实现以下几个动作：1）锤头的往复打击；2）锤头的径向送进与退出；3）工件的旋转；4）工件的轴向送进运动。

图 5.6-5 所示的径向锻造机的锤头往复打击动作靠机械传动实现。主电动机经 V 带带动传动箱Ⅰ工作，并经浮动联轴器带动装在锻造箱Ⅱ中相应的三个偏心套中的偏心轴旋转，经连杆带动三个锤头作同步往复运动。在锻打台阶轴或锥度轴时，为了得到不同的锻件直径，就需要使偏心轴能在旋转时，改变偏心轴轴线位置，这一动作称径向送进。锤头



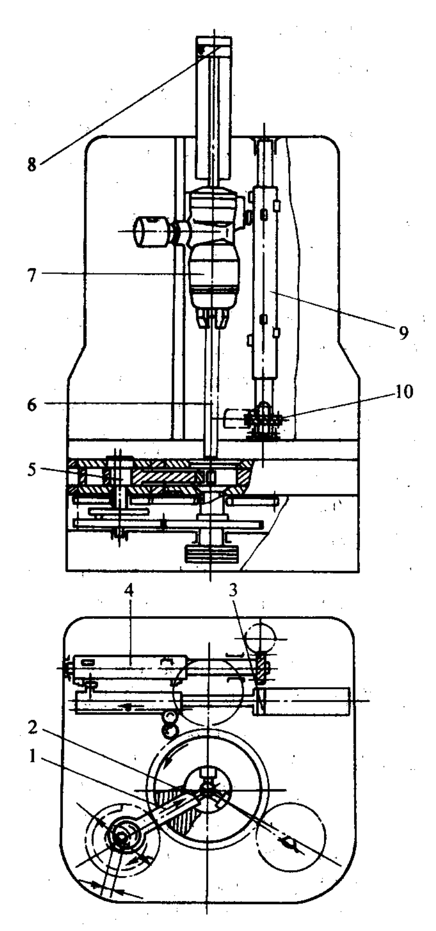


图 5.6-5　立式径向锻造机

1—连杆；2—锤头；3—水平液压缸；4—锤头水平控制；5—偏心轴；6—坯料；7—夹头；8—夹头液压缸；9—垂直控制；10—螺旋齿轮

径向送进是通过水平液压缸往复运动的活塞杆前端的一段齿条，经一系列齿轮带动锻造箱Ⅱ的大齿圈转动，带动偏心套下部齿轮，使偏心套转动，从而使装在偏心套里的芯轴的轴心产生位移，实现径向送进运动。水平液压缸活塞杆前端装有滚轮可由挡块控制位置，以便调节径向尺寸。如果没有径向送进即偏心轴在某一固定位置上旋转，锤头只能有一个闭合直径。夹头靠气动元件夹紧工件，并由电动机经蜗轮蜗杆减速机构带动夹持着的工件旋转。在液压驱动的夹头缸作用下，夹头沿着床身Ⅲ导轨作上下移动，实现轴向送进，由挡块控制送进位置，控制轴向尺寸。径向锻造机的径向送进，轴向送进和分度等动作，均由程序控制盘经步进选择器用电液阀按预选动作进行程序自动控制。14 000 kN 径向锻造机的最大开口直径为 ϕ650 mm，能锻 4 200 kg 重的八角钢锭，大于 4:2 t 的钢锭要水压机先开坯。国产径向锻造机的规格型号见表 5.6-1，部分进口锻机的情况见表 5.6-2。

(2) 卧式径向锻造机

1) ϕ85 mm 卧式径向锻造机　卧式径向锻造机与立式径向锻造机相比，具有可显著增加工件长度及便于装卸工件和实现自动化等优点。1975 年济南铸锻机械研究所设计、并在第二汽车厂的协助下制造了一台 ϕ85 mm 的卧式精锻机。图 5.6-6 为 ϕ85 mm 卧式径向锻造机的总体布置示意图。它也是由传动箱、锻造箱和床身（夹头）组成。它还有锤头调节机构，夹头装置、上下料机械手、液压供油系统和操纵系统。由主电机带动传动箱Ⅱ将动力经十字联轴器传给锻造箱Ⅰ，使夹头产生打击能力。锻造箱的前后配一个或两个夹头，与夹头对称地配一个或两个定心装置和托料支架装置。

① 机器总体（Ⅰ）。锻造箱中央对称布置的四个锤头同步地作每分钟 650～800 次的锻打运动（参看锻造箱和传动箱部分），同时通过直径调节机构使四个锤头同步地作调节运动，即同步地扩大或缩小其闭合空间的运动，使锻件的直径相应地增大或缩小。在作调节运动时，调节机构带动锤头控制板作上下移动。锤头控制板上共有 15 行槽，在每行槽里都可布置挡块，每行槽的挡块都相应有一个微动行程开关，这些微动行程开关装在固定的控制盒内。夹头Ⅰ和夹头Ⅱ以各自的夹爪夹持工件转动（参看Ⅳ部分）。夹头液压缸带动夹头和工件作轴向运动。每个夹头上都装有跟着一起作轴向运动的控制板。两个夹头控制板各有 27 行槽，在每行槽里都可布置挡块，每行槽的挡块都相应有一个微动行程开关，这些开关都装在固定的控制盒内。自坯料夹紧直到工件锻打完毕的整个锻打循环是用程序控制自动完成的。

② 程序控制锻打循环。程序控制的基本电器元件是“步进选择器”。本机采用的步选器共有 25 个工步，其单数工步是指令锤头作调节运动的，其双数工步是指令夹头（1 或Ⅱ）作轴向运动的。锤头控制板自左至右的前 12 行槽和

表 5.6-1　国产径向锻造机的规格型号

型号	锤头数	打击力/kN	打击次数/min^{-1}	工件最大直径/mm	工件最大长度/mm	锤头调节量/mm	电机功率/kW
D61－80	3	1 000	600	80	1 000	36	28
D61－80A	3	1 000	600～800	80	1 000	40	40
D63－80	3	1 000	600	80	1 000	36	28
JD135	3	1 000	500	135	1 100	90	28
DA65－125	2	2 500	600	125	1 300	50	55
DA65－85	4	1 200	600～800	85	700	45	55

表 5.6-2　部分进口径向锻造机的情况

型号	吨位/kN	使用厂	主要用途	备注
SX－25	4×4 000	太原 743 厂	锻车轴、砲管	已迁大连
SX－32	4×2 000	太原重机厂	锻车轴	年产火车轴 8 万根
SX－32	4×2 000	太原 743 厂	锻车轴	
SX－40	4×8 000	重庆特钢公司	特钢锻材	
SX－55	4×10 000	抚顺钢厂	特钢锻材	年产锻材 2.5 万吨
SX－65	4×14 000	河南济源特钢	大型锻件	

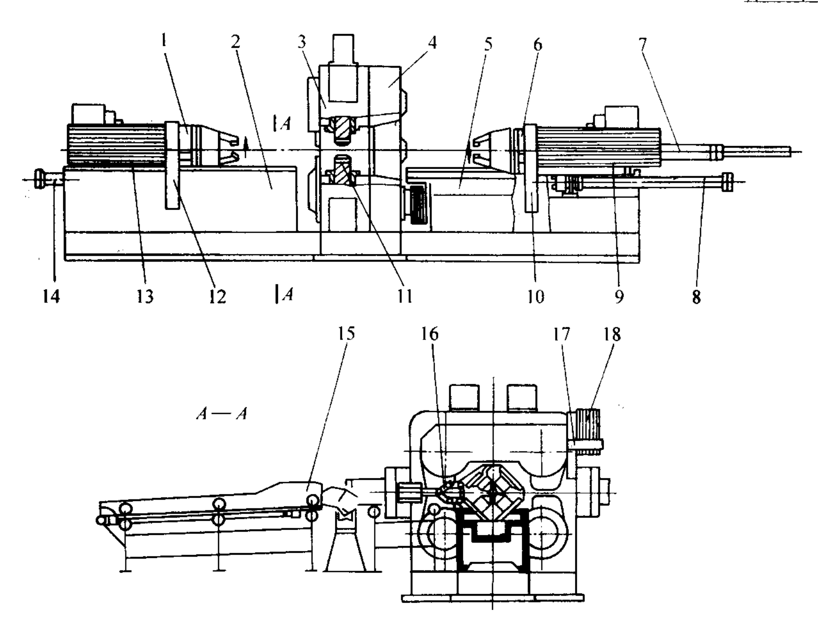


图 5.6-6 ϕ85 mm 卧式径向锻造机的总体布置示意图

1—夹头Ⅰ（主夹头）；2—床身Ⅰ；3—锻造箱；4—传动轴；5—床身Ⅱ；6—夹头Ⅱ（辅夹头）；控制板；
7—芯棒装置；8—夹头Ⅱ液压缸；9—控制板；10—控制盒；11—锤头；12—空制盒；13—控制板；
14—夹头Ⅰ液压缸；15—上下料装置；16—定心装置；17—控制盒；18—锤头控制板

两个夹头控制板自上至下的前 12 行槽都是用来布置程序控制撞块的。某行撞块按该工序所要求的夹头（或锤头调节）的停位尺寸布置好，当此撞块碰压相应的微动行程开关时，夹头（或锤头调节）便停在预定的位置上。夹头控制板撞块用于控制锻件各台阶的长度。锤头控制板撞块用于控制锻件各段的直径。由于步进选择器的功能，当程序控制进行到某一步时，只有与该步相应的撞块碰压行程开关才能发信号，同块控制板上其他槽中的撞块即使碰压开关也不发信号。锻打时，锤头的调节运动和夹头的轴向运动交替进行，直至锻完工件的各个台阶。例如，要锻打图 5.6-7 所示的工件，其过程如下。首先，锤头调节处于最大空间位置，夹头夹持坯料向前（即向锤头）作第一次送进，当把坯料送到与锤头的相对位置 a 处时，夹头控制板第 20 行撞块发信号，使步进选择器跳入第一步。后者指令夹头停位且锤头作进锤的调节运动直到把工件直径从 d_1 减缩到 d_2 时，锤头控制板第 1 行撞块发信号，使步进选择器跳到第 2 步，后者指令锤头调节停位且夹头作后退运动，这时工件即按直径 d_2 引伸。当工件退到相对位置 b 处，夹头控制板第 1 行撞块发信号使步进选择器跳到第 3 步，后者指令夹头停位且锤头再作进锤运动，当把工件直径从 d_2 减缩到 d_3 时，锤头控制板第 2 行撞块发信号，使步进选择器跳到第 4 步，后者指令锤头调节停位且夹头再作后退运动，这时工件即按直径 d_3 引伸，直到工件退到相对位置 c 处（工件已全部锻打完毕）。这时夹头控制板第 2 行撞块发信号，使步进选择器跳到第 5 步，后者指令进行复位动作。即：a）夹头夹持工件快速退出，到一定位置停住，接着可进行下料；b）同时锤头快速退锤，到

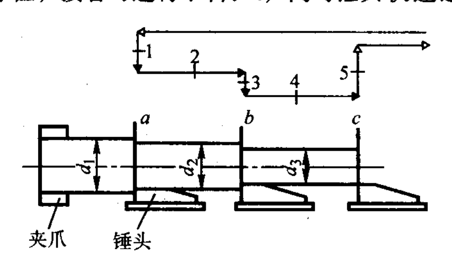


图 5.6-7 工件

最大空间位置停住；c）步进选择器本身恢复到零位。步进选择器在哪一步进行复位，可按工艺要求选定。复位动作完成后，便可进行第 2 次循环，锻打第 2 根工件。

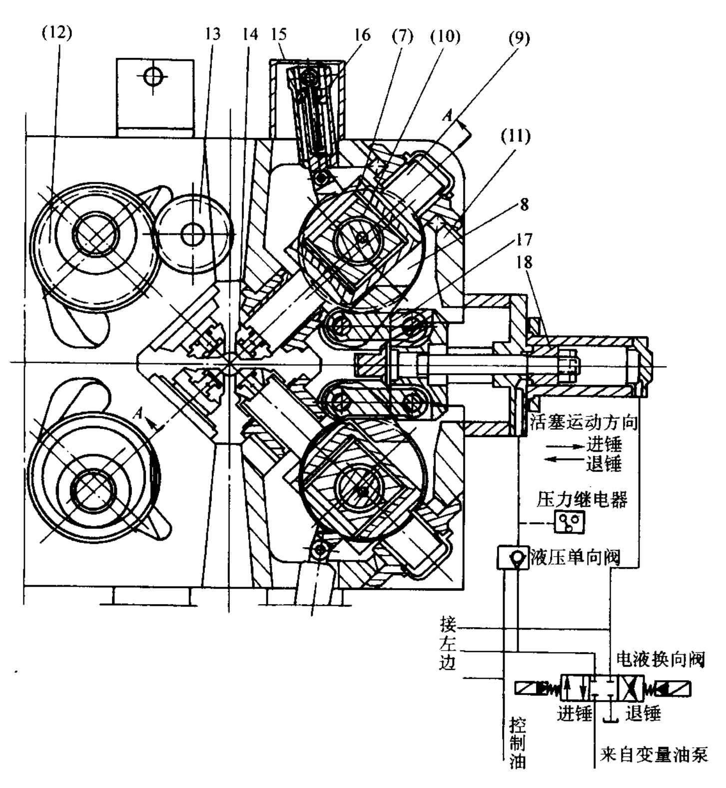
第一步夹头的轴向运动都有下面 4 种选择：a）运动方向选择（前进或后退）；b）运动速度选择（快速、中速或慢速）；c）停位前减速选择（减速或无减速）；d）工步延时转换选择（延时或无延时）。

每一步锤头调节运动有下面的三种选择：a）运动方向选择（进锤或退锤）；b）运动速度选择（快速、中速或慢速）；c）工步延时转换选择（延时或无延时）。

工步延时转换通常用于下述场合，当进锤结束后，让夹头延时一会儿再运动，使锤头能多打一会儿，以提高锻件在相应部位的表面品质，例如得到清晰的台阶根部。当夹头某步运动的距离较长而且要求准确停位时，可在该步选用“减速”，即让夹头先以快速或中速运动，到接近需停的位置时即由相应的撞块发信号减成慢速而后停位。

③ 锻造箱和传动箱部件。图 5.6-8 为锻造箱和传动箱部件的结构原理图。

a）锻打机构。主电动机通过传动带和传动箱体 5 中的 3 个中间齿轮带动 4 个传动齿轮 1 旋转。如图 5.6-8 所示，每个传动齿轮 1 以固定在其上的 2 个拨块 2 转动浮动盘 3，后者借 2 个拨块 4 转动飞轮 6，拨块 4 固定在飞轮 6 上，飞轮又带动偏心轴 7 旋转。浮动盘 3 的两面各有一条长槽分别与拨块 2 和拨块 4 作可相对滑动的嵌接，这两条槽互相垂直。偏心轴的旋转一方面带动滑块 10 相对于连杆 9 作直线往复运动，同时带动连杆 9 和固紧在连杆端头的锤头 14 作往复运动，其行程等于偏心轴偏心距的 2 倍。件 10 固然是滑块，而连杆 9 实际上也是一个滑块，所以称此为双滑块结构。双滑块结构有以下优点：i）使锻打部分的结构强度大为增加，提高了整个机器运转的可靠性。ii）在卧式精锻机上采用双滑块结构，便于采取有效措施，防止氧化皮的侵扰，而且在锻造箱体 11 上可以开出排除氧化皮的下孔道和排烟的上孔道。iii）连杆作纯往复锻打动作。iv）各个锤头的运动不同时受约束，提高了运转的独立性，而且连杆的导向性能也大大改善。双滑块结构的缺点是滑块往复运动的



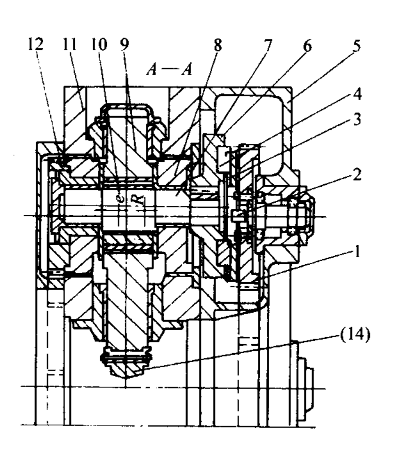


图 5.6-8　锻造箱和传动箱部件结构原理图

1、12、13—齿轮；2、4—拨块；3—浮动盘；5—右箱体；6—飞轮；7—偏心轴；8—偏心套；9—连杆；10—滑块；11—左箱体；14—锤头；15—摆动压紧液压缸；16、18—活塞；17—拉杆

惯性较大，增加了主电机的启动转矩和功率，易引起机器振动。

b）锻打直径的调节机构。如前所述，4 根偏心轴 7 是分别支承在 4 个偏心套 8 上的。使 4 个偏心套同步地作一定角度的摆转，就可改变偏心轴支承点的位置，从而使 4 个锤头同步地扩大或缩小其闭合空间，使锻件的直径相应地增大或减小。图 5.6-8 右边的一个液压缸活塞 18，通过 2 根拉杆 17 可以带动右边的 2 个偏心套作一定角度的同步摆转。左边的情况与此对称。在上面的 2 个偏心套上都固定有一个齿轮 12，其间用 2 个中间齿轮 13 衔接，这样，4 个偏心套就都同步摆转了。如图 5.6-8 右下角的锻打直径调节图所示，O 点为偏心套本身的摆转中心；R 为偏心轴支承中心对 O 点的距离，称为偏心套的调节半径；ϕ_0 为偏心轴支承中心的原始位置角度；ϕ 为偏心套最大摆转角。相应于 ϕ 角，偏心轴支承中心从 O_2 点（前限点）摆转到 O_1 点（后限点）。l 即为直径调节量的一半；e 为偏心轴的偏心距。ϕ85 mm 卧式径向锻造机的 $R=38$ mm；$\phi_0=20°$；$\phi=45°$；$l=29$ mm；$e=7$ mm。调节运动在锤头不接触工件的时间内可连续进行，即活塞 18 可连续带动偏心套摆转，而在锤头接触工件的时间内，由于活塞 18 的拉力所加于偏心套的力矩不足以克服锻打力所加于偏心套的反力距（参看下节），所以此时调节运动停止，当锤头一离开工件再继续进行。

c）偏心套的液压启锁和锻打机构的过负荷液压保护。当锤头锻打工件时，锻打力通过偏心轴支承而作用于偏心套上，产生一个使偏心套作退锤摆转的力矩，这样就需要给偏心套一个平衡力矩，使它不会退转，这称为偏心套的自锁。ϕ85 mm 卧式径向锻造机采用了主要元件为液控单向阀的液压自锁。如图 5.6-8 的右边所示，当液压缸活塞作进锤运动（向右运动）或进锤完毕，停止于某一位置时，由于单向阀的阻逆作用都不允许活塞向左运动，即不允许偏心套作退锤摆转。当需要退锤时，控制油将单向阀打开，活塞就可向左运动。这种自锁方法有以下优点：i）自锁可靠，效果良好，锻件的直径较准确；ii）偏心套的调节半径 R 不受摩擦圆半径的限制，R 值可取得较大，因此可以在不加大偏心套直径的情况下加大直径调节量。这种方法的缺点是在退锤时不能自锁，所以在退锤时不能进行锻打，例如从小头到大头的锥度锻打。锻打机构的过负荷液压保护主要是利用装在液控单向阀和油缸之间的压力继电器。压力继电器所控制的液压力根据锻打机构所允许的最大锻打力和力臂关系来计算。当锻打力超过允许值时，压力继电器发出信号，令液压缸活塞 18 作快速退锤运动，使锤头与工件脱离，起保护作用。从发信号到脱离的这段短暂时间内，锤头可能锻打工件达 2、3 次，这可以考虑由主电动机传动带的瞬时打滑保护。

d）偏心套压紧机构。偏心套与锻造箱孔的配合需要取较大的空隙，ϕ85 mm 卧式径向锻造机取 0.25～0.35 mm。为避免此间隙在锻打时引起偏心套振动，用 4 个摆动液压缸 15 和活塞 16 来分别推拉 4 个偏心套，使偏心套始终靠在受力一面的箱体孔壁，这称为偏心套的压紧。当偏心套不动时，油腔内的油以一定压力作用于活塞；当偏心套作退锤摆转时油泵向油腔充油；当偏心套作进锤摆转时，由于拉杆 17 加于偏心套的力矩大于活塞 16 加于的力矩，所以偏心套反过来带动活塞把油从油腔内压出。当偏心套摆转时，压紧液压缸 15 内的油压为低压，以减少摆转的阻力；当偏心套不动时，压紧液压缸内的油压就变为高压。

④ 夹头部件。图 5.6-9 为夹头部件结构原理图。电动机 1 通过两级齿轮和 2 个销轴 2 带动主动环 18 旋转，主动环通过 2 根旋转缓冲弹簧 15（用于正转）和 17（用于反转）带动从动环 16 旋转，后者经主轴 8 和 3 个夹爪 10 带动工件旋



转。支持盘6用3根轴5支于夹头体3上，支持盘相对于主轴8的轴向位置是固定的，相对于夹头体的轴向位置则因2个轴向缓冲弹簧4和7而浮动。在支持盘上装有3个液压缸和活塞13，活塞带动楔块9使夹爪张开和夹紧。楔块是跟随夹爪一块转动的。夹头的转速只采用一挡，不需变速。这样简化了转动的传动机构且对设备的性能不会有很大的影响。所以，ϕ85 mm卧式径向锻造机的夹头只采用了一种转速，每分钟42次。

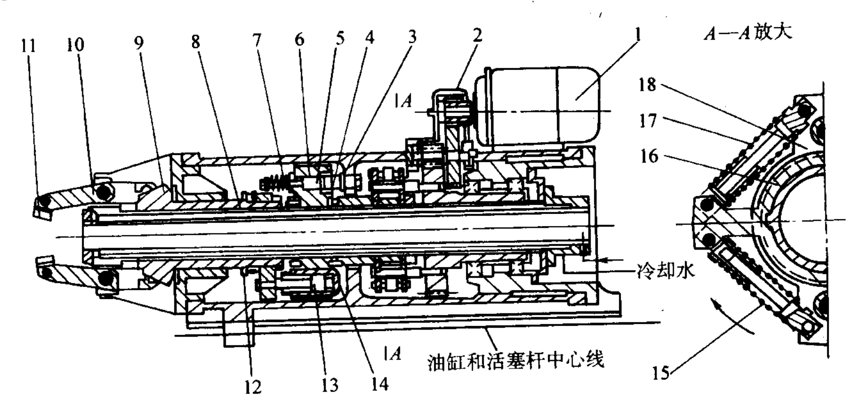


图5.6-9 夹头部件结构原理图

1—电动机；2—销轴；3—夹头体；4、7—弹簧；5—轴；6—支撑盘；8—主轴；9—楔块；10—夹爪；11—夹爪钳口；12、14—止推轴承；13—活塞；15、17—缓冲弹簧；16—从动环；18—主动环

当进行锻打的时候，锤头在接触工件的时间内，把工件抱住，工件不能作轴向送进，也不能扭转。但是，此时夹头体的轴向运动和夹爪的旋转运动仍在进行。所以夹头上需要有轴向缓冲机构和旋转缓冲机构。

轴向缓冲机构主要是轴向缓冲弹簧4和7。当锤头抱住工件时，夹爪10、主轴8和支持盘6都不能作轴向运动，而夹头体3继续作轴向运动，如果是向前（图上向左）运动，则夹头体带动轴5压缩弹簧4；如果是向后（图上向右）运动，则轴5压缩弹簧7，从而起到缓冲作用。当锤头离开工件后，轴5与弹簧又恢复到原来的相对位置，整个夹头继续作轴向送进。

旋转缓冲机构主要是主动环18、从动环16以及旋转缓冲弹簧15和17。当锤头抱住工件时，夹爪10、主轴8和从动环16都不能旋转，而电动机则仍带动主动环18以前的环节转动。如果是正转，则压缩2个弹簧15；如果是反转，则压缩2个弹簧17，从而起到缓冲作用。当锤头离开工件后，弹簧即恢复到原来的相对位置，夹爪10带着工件又继续旋转。

ϕ85 mm卧式径向锻造机夹头的这种旋转缓冲机构在使用时，夹爪钳口11和工件之间可能产生径向打滑，影响锻件的表面品质。这主要是因为旋转缓冲弹簧16和17在起缓冲作用前，首先要传递能带动从动环16以后各环节转动的转矩。在夹爪夹紧工件时，由于活塞的推力和液压缸的反作用力压紧了止推轴承12和14，此转矩变得相当大，因而弹簧16或17的大部分压缩量都用于传递旋转力矩，只有剩下的小部分压缩量起缓冲作用。此时弹簧的压缩力已经相当大，所以缓冲性能较差。

2）D65－ϕ100型卧式径向锻造机　D65－ϕ100径向锻造机是我国辽阳锻压机床厂生产的，1979年开发研制成功两台。适合于一般台阶轴，锥度轴及空心管状坯件的锻造。具有全自动、半自动、手动三种操作方法。全自动操作包括上料程序，锻造程序和下料程序。半自动操作精简了下料程序。而手动操作则是采用按钮或手柄等完成锤头的径向送进和夹头的轴向送进及手工上下料等。

① D65－ϕ100卧式径向锻造机的技术参数

最大可锻直径（毛坯）	100 mm
最大可锻长度	1 000 mm，1 250（1 500）mm，1 600 mm，2 000 mm
锻造锤头数	4
单个锤头允许最大锻造力	1 250 kN
单个锤头打击频率	600 min^{-1}
最大锤头缩减量（同一锤头）	60 mm
最大工步数	30
上下料机构允许最大质量	60 kg

② D65－ϕ100型卧式径向锻造机的主要结构及传动原理

整机由以下几个部分组成：锻造箱，主传动箱，径向送进机构，夹头床身，液压部分，电气部分，反向支承，前定心，自定心，芯棒机构，上料车，上料机械手，下料车，下料机械手及润滑，空气，水冷装置等。其主要动作均由液压传动系统来完成。锻机主体由锻造箱，主传动箱，径向送进机构组成。如图5.6-10所示，四个锤头的同步打击运动，由电动机通过带轮1、中间齿轮2，转动带动4个（图中只表示3个）大齿轮3转动，再通过浮动盘飞轮装置4带动四个偏心轴5。偏心轴5的转动通过双滑块机构7，形成主滑块的往复打击运动。锤头安装在主滑块上。锤头的径向送进，由两只液压马达驱动，通过齿轮副9带动螺杆轴旋转，使螺母上下运动拉动偏心套6转动，造成锤头的径向进给。为保证两只液压马达的同步，两螺杆轴用联接轴连在一起，同时通过齿条反压液压缸11给偏心套6一反向转矩，消除偏心套承力面的间隙，减小打击时的振动，也帮助实现退锤动作。

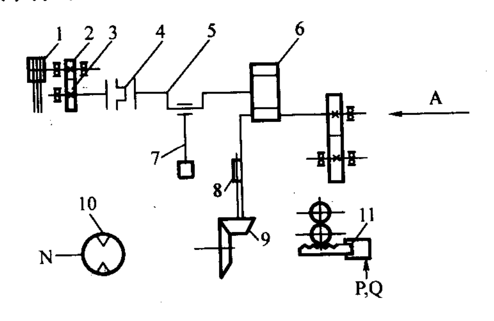


图5.6-10 径向锻造机主体传动系统简图

1—带轮；2—中间齿轮；3—大齿轮；4—飞轮装置；5—偏心轮；6—偏心套；7—双滑块机构；8—螺母；9—齿轮副；10—液压马达；11—反压液压缸

③ 液压传动系统。径向锻造机的其他动作均由液压系统完成。液压传动系统装机总容量34 kW，由四台液压泵供

油，最高工作压力为21 MPa，采用分立板式液压元件集中控制方式。

a）夹头的轴向送进。夹头只用来夹持工件，并传递转动及轴向运动，夹头轴向运动有四种速度，空行程高速，中速锻打，低速锻打，仿形速度，可以满足不同的工艺要求。见图5.6-11。调速阀1 V、2 V、3 V、4 V分别用来调整低速，中速，仿形速度和快速。快速时，$\theta=\theta_1+\theta_2$。液压缸为差动液压缸，以加快夹头的运动速度，溢流阀和单向顺序阀用来消除液压缸的"前冲"。

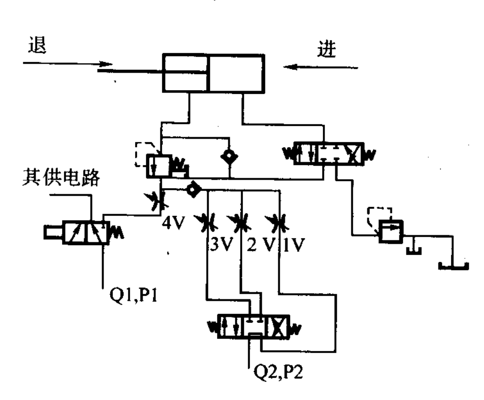


图5.6-11　夹头的轴向送进

b）锤头的径向送进。液压马达系统由两只液压马达的正（反）转，实现锤头的进（退）动作（参见图5.6-10），同时由偏心套反压液压缸系统协助完成退锤动作（参见图5.6-12）。锤头的送进速度分别为低速，中速，仿形速度，和高速退回四种速度，与夹头的轴向速度相对应。阀1 V控制速度的选择，阀2 V控制锤头的运动方向，阀3 V用来实现快速退锤动作，两只单向顺序阀构成油马达的制动缓冲回路。在进（退）锤动作的同时，偏心套反压液压缸的（齿条）柱塞也随之运动，进锤时柱塞缸的工作介质排回增速器腔内，退锤时增速器腔内的压力油推动柱塞运动，协助退锤，并起到反压作用，阀4 V用来补油。

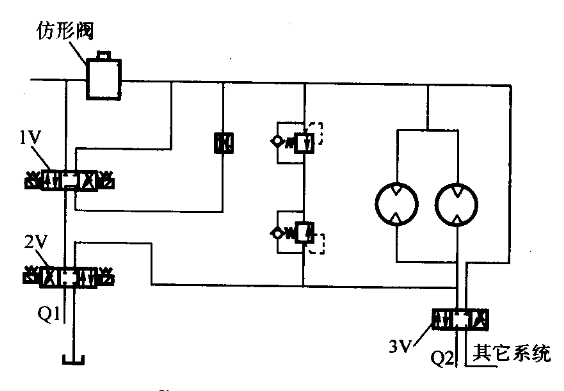


图5.6-12　偏心套反压系统

④ 上料机械手。上料机械手（图5.6-13）的功用是将料车送来的工件送交给夹头，并在锻打程序中对工件进行调头，其基本功用有手指松（抓），手腕伸（缩），回转和手臂摆动等动作，参见图5.6-14。上料机械手完成的动作顺序大致为手腕伸—手指夹—手臂摆向夹头—（夹头夹持后）手指松—手腕缩—手臂摆回原位。当有调头动作时，手腕回转。当手指夹紧后，1 V打开，使手臂摆向夹头，该顺序动作回路确保工件不致脱落。2 V，3 V分别为手臂，手腕持重的支承阀。液压传动系统还有夹头的夹和松，前后定心机构的开、闭，下料机械手卸料动作、仿形和拔芯棒等动作及调速和改进方法，这里不作介绍。

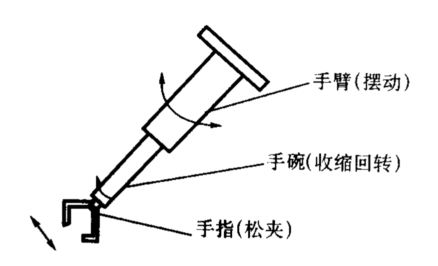


图5.6-13　上料机械手示意图

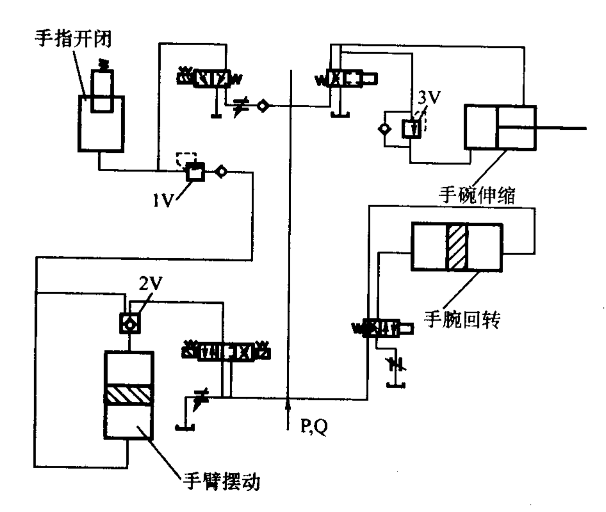


图5.6-14　上料机械手控制回路

3）SHP13 151A式径向锻造机。奥地利GFM公司的SHP13 151A式径向锻造机结构简单，单夹头，无芯轴装夹装置。

① 主要技术参数

锻造锤头数	4
每个锤头锻造力	1 600 kN
锤头打击次数	600 次/min^{-1}
锤头长度	270 mm
最大锻造截面	ϕ130 mm
锤头最大直径调节量	80 mm
夹头的最大夹紧直径	130 mm
夹头行程	2 000 mm
最大工件长度	1 500 mm

② 基本结构。如图5.6-15所示，该机主要由传动箱9，锻造箱8，锤头调节机构3，夹头装置6，上料机械手1，下料机械手4，液压系统及操作系统14等部分组成。径向锻造机的核心部分是传动箱9，锻造箱8和锤头调节机构3，它们装置在支架上。支架用螺栓固定在基础板架上。主电动机11通过联轴器和齿轮传动，带头传动箱9中四个主传动轴同时转动。四个主传动轴通过浮动盘带动锻造箱8中四个偏心轴转动，偏心轴带动锻造连杆往复运动。装在连杆一端的锤头便实现了对锻件的打击。成45°对称分布的四个偏心轴安装在四个偏心套上，通过安装在锻造箱两侧的锤头调节机构带动锻造箱中的四个偏心套。它由两个液压马达驱动。液压马达经过锥齿轮联轴器、电磁阀制动器、蜗杆副等传动系统，用拉杆带动锻造箱中的四个偏心套同步旋转。单个偏心



轴轴心最大移动距离为 40 mm，一对偏心轴轴心移动距离为 40×2 = 80 mm，从而实现进锤和退锤。锤头的直径调节范围为 80 mm，为了避免振动，消除间隙，保证锻件径向精度。每个偏心套装有 2 个拉紧缸，一旦锤头调节结束后，拉紧缸即将偏心套拉紧，为了防止锻造力太高，影响偏心轴和连杆寿命，在调节机构中设有过载保护装置，一旦超过允许的锻造力时，锻造过程立即中断，锤头自动开启到最大。锻造箱旁边装有控制锤头运动的挡块板。

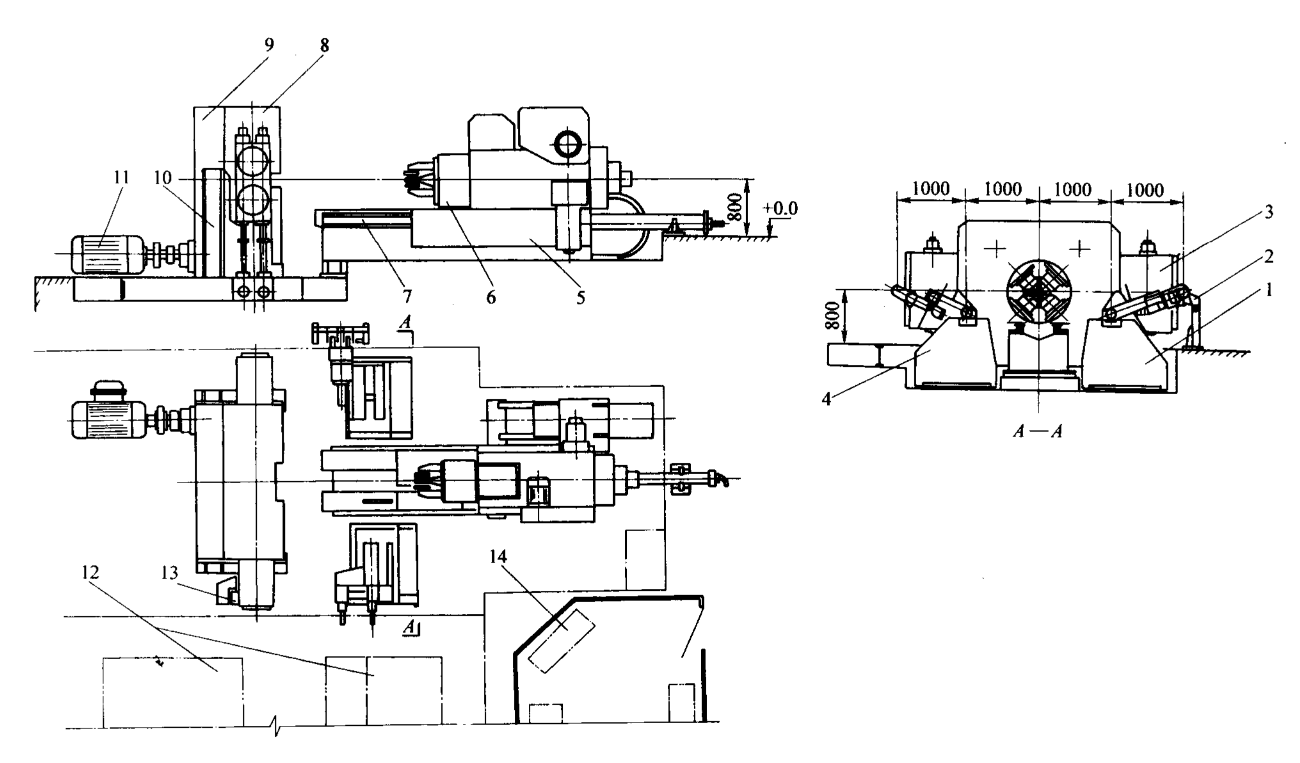


图 5.6-15　SHP 13 151A 卧式径向锻造机的机构示意图

1—上料机械手；2—上料架；3—锤头调节机构；4—下料机械手；5—夹头；6—夹头装置；7—夹头床身导轨；8—锻造箱；9—传动箱；10—夹架；11—主电动机；12—液压及润滑供油系统；13—锤头挡块板；14—操纵系统

夹头床身和基础框架一端连成一体，便于安装调整。夹头床身除作为夹头运动导轨外，还装有控制夹头运动的挡块板。装在夹头上的电机能使夹头旋转，当锻横截面为方形的坯料时，通过分度机构，可使夹头轴准确地停止在 45°或 90°位置。上料机械手能夹紧和松开坯料、工件翻转 180°、调头和内摆动作，下料机械手 4 可将锻好的工件由夹头板上取下，并翻转至外侧，实现下料动作。液压供油系统分润滑系统和液压系统两个部分。润滑系统主要用于锻造箱、传动箱、锤头调节机构和夹头导轨中运动部件润滑。通过安装在控制台上的压力继电器监视润滑部分的工作压力。当工件压力低于额定压力时，故障灯闪光并报警，自动切断主电机和液压电机。液压系统用于锤头调节、夹头纵向运动、夹头夹爪松开夹紧和上下料机械手的翻转动作。设备受有辐射热，热传动影响的部分，液压和润滑部分设有水冷冷却器。当油温超过指定温度时，冷却器自动通水冷却。该机工作时，采用多频率制动器代替弹簧缓冲器，随着锤头 700 次/分的打击频率，频率控制器同样以每分钟 700 次的频率有节奏地工作。操纵系统由控制台、程序控制和电气元件组成，工件安装可靠。从上料到锻造完毕卸料全是程序控制。

3　径向锻造的力能参数

3.1　径向锻造机锻造变形力的计算

目前尚无精确的计算公式计算三个以上锤头进行径向锻造时的变形应力和变形力。一般公式的推导按下述假设进行。1）径向锻造时的金属变形按轴对称问题考虑，并采用圆柱坐标系描述。2）接触面边界满足 Coulomb 摩擦条件，接触面切应力与正应力成正比，即 $\tau = \mu\sigma_s$，μ 为摩擦系数。塑性变形时接触面切应力达最大值，即 $\tau = \frac{\beta\sigma_s}{2}$；在轴对称问题中，系数 $\beta = 1$，σ_s 为锻造温度下变形金属的流动极限。3）在符合 Coulomb 摩擦条件时，锤锻面与自由表面的交界区，由于 μ 很小，$\tau \to 0$，塑性条件为：$\sigma_{max} - \sigma_{min} = \beta\sigma_s$。$d\sigma_x = d\sigma_z$。

（1）径向锻造机锻造棒料变形力的计算。锤头和工件的接触面呈圆弧面（参见图 5.6-16 所示之径向锻造机锻轴时的受力情况），圆弧面中心角（锤头包角）为 θ_A，圆柱面多向受压，径向锻造机有 m 个锤头则表示在 m 个方向受压。选用圆柱坐标系（ρ、α、θ），从变形体内割取垂直于 z 轴，距 ρ 轴为 z，宽 dz 的两个竖直面和接触面所包围的微分单

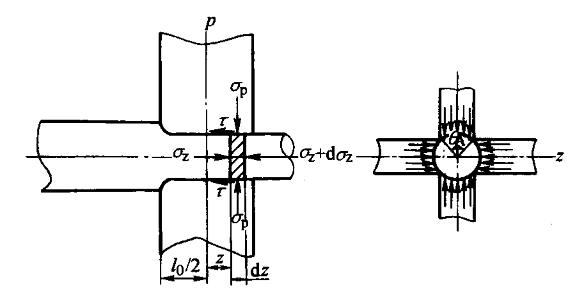


图 5.6-16　径向锻造机锻轴时的受力情况



元体（单元圆柱），接触面的弧长为$\frac{d}{2}\theta_A$。设径向锻造工件的最后直径为 d，ρ 轴通过锤头中心线。σ_z 在 ρ_θ 面上均布，σ_ρ 沿接触面 θ_A 圆弧面均布，弧边界为自由表面，$\sigma_\theta=0$。可列出沿 z 轴的近似平衡方程式：

$$\sigma_z\frac{\pi d^2}{4}-(\sigma_z+d\sigma_z)\frac{\pi d^2}{4}-m\tau\frac{d}{2}\theta_A dz=0$$

$$\frac{\pi d^2}{4}d\sigma_z-m\tau\frac{d}{2}\theta_d dz=0 \quad (5.6\text{-}1)$$

式中，θ 为弧度；m 为锤头数。

$$d\sigma_z=-\frac{2m\tau\theta_c}{\pi d}dz$$

因为是轴对称变形，为了消除因假设 σ_ρ 均布对单位流动压力的影响，取 $\beta=1$，接触面切向应力 $\tau=\frac{\beta\sigma_z}{2}$及近似塑性条件代入（5.6-1）式中可得 $d\sigma_\rho=\frac{m\beta\sigma_s\theta_0}{\pi d}dz$，积分得

$$\sigma_\rho=\frac{m\theta_0\beta\sigma_s}{\pi d}z+e \quad (5.6\text{-}2)$$

当 $z=\frac{l_0}{2}$（l_0 为锤头宽度）时，$\sigma_z=0$，$\sigma_\rho=\beta\sigma_s$。因为 μ 很小，$\tau\to0$。$\sigma_{max}-\sigma_{min}=\beta\sigma_s$，代入式（5.6-2）得

$$\beta\sigma_s=-\frac{m\theta_0\beta\sigma_s}{\pi d}\times\frac{l_0}{2}+c$$

$$c=\beta\sigma_s+\frac{m\theta_{0\beta\sigma_s}}{\pi d}\times\frac{l_0}{2}$$

将 c 代入式（5.6-2），得出锤击面正应力：

$$\sigma_\rho=\beta\sigma_s+\frac{m\theta_0\beta\sigma_s}{\pi d}\times\frac{l_0}{2}-\frac{m\theta_0\beta\sigma_s}{\pi d}z=\beta\sigma_s[1+\frac{m\theta_0}{\pi d}(\frac{l_0}{2}-z)] \quad (5.6\text{-}3)$$

将 σ_ρ 沿压力平面积分求得变形力 P，由于锤头长度为 l_0，所以 $P=2\int_0^{\frac{l_0}{2}}\sigma_\rho dF$。由于

$$dF=2\frac{d}{2}\sin\frac{\theta_0}{2}dz$$

$$\begin{aligned}P&=2\int_0^{l_0/2}\sigma_\rho 2d/2\sin(\theta_0/2)dz\\&=2\int_0^{l_0/2}\beta\sigma_s(1+m\theta_0/(\pi d)-(l_0/2-z))d\sin(\theta_0/2)dz\\&=2\beta\sigma_s d\sin\frac{\theta_0}{2}\ (\frac{l_0}{2}+\frac{m\theta_0 l_0^2}{4\pi d}-\frac{m\theta_0 l_0^2}{\delta\pi d}) \quad (5.6\text{-}4)\\&=\beta\sigma_s dl_0\sin\frac{\theta_0}{2}\ (1+\frac{m\theta_0 l_0}{4\pi d})\end{aligned}$$

当 $\beta=1$ 时，

$$P=\sigma_s dl_0\ (1+\frac{m\theta_0 l_0}{4\pi d})\ \sin\frac{\theta_0}{2} \quad (5.6\text{-}4a)$$

（2）径向锻造机锻造管料变形力的计算

某厂推荐计算中空管径向锻造锻打力的经验公式可以采用型砧下带芯棒延伸的变形力计算公式。

$$P=k_1\sigma_s L_0 D[1+\mu_s(\frac{1}{S}+\frac{1}{D})\frac{l_0}{3}]$$

式中，σ_s 为流动应力，MPa；L_0 为砧长度，取锤头总长的 40%，mm；D 为锻件外径，取大头端外径尺寸，mm；μ_s 为摩擦因子，取为 0.5；S 为锻件壁厚，取大头壁厚，mm；k 为与减缩率有关的系数，一次减缩率在 2～4 时，k 取为 1.05；一次减缩率在 2～3 时，k 取为 1。

3.2 锤头行程、运动速度和加速度

（1）锤头行程

如图 5.6-17 所示，偏心轴 OA 绕 O 点以转速 n_e 旋转，OA 为偏心距 e。在下行程下死点时，锤头进入工件的 B 处，今自 OB 线逆偏心轴转 α 角，则锤头相应自 B 点沿径向向工件表面退出，其行程为 S_x。如以 B 为圆心，以 AB 为半径作弧与 OB 交于 C_2，则从图 5.6-17 可知：

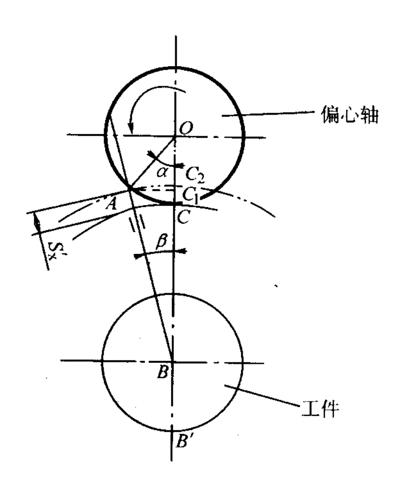


图 5.6-17 径向锻造机锤头运动分析简图

$$S'_x=AB-CB=C_2B-CB=C_2C=C_2C_1+C_1C$$
$$C_2C_1=AB-AB\cos\beta=AB(1-\cos\beta)$$

根据几何关系，由正弦定理，在△OAB 中$\frac{AB}{\sin\alpha}=\frac{OA}{\sin\beta}$。因为 OA 为 e，所以有$\frac{AB}{\sin\alpha}=\frac{e}{\sin\beta}$，$C_2C_1=\frac{e\sin\alpha}{\sin\beta}$（$1-\cos\beta$）。

又因为 $C_1C=OC-OC_1=OA-OA\cos\alpha=e$（$1-\cos\alpha$），所以

$$\begin{aligned}S'_x&=\frac{e\sin\alpha}{\sin\beta}(1-\cos\beta)+e(1-\cos\alpha)\\&=\frac{e\sin\alpha}{2\sin(\frac{\beta}{2})\cos(\frac{\beta}{2})}2\sin^2(\frac{\beta}{2})+e(1-\cos\alpha)\\&=e\sin\alpha\tan\frac{\beta}{2}+e(1-\cos\alpha)\end{aligned} \quad (5.6\text{-}5)$$

因为 β 很小，故 $\tan\frac{\beta}{2}\to0$，所以

$$S'_x=e(1-\cos\alpha) \quad (5.6\text{-}6)$$

其误差大概为 1.3%～2.1%。由图 5.6-17 也可看出，当 β 很小时，

$$S'_x=AB-CB=C_1B-CB=e(1-\cos\alpha)$$

（2）锤头运动速度

$$\begin{aligned}v&=\frac{dS'_x}{dt}=e\sin\alpha\frac{d\tan\frac{\beta}{2}}{dt}+e\tan\frac{\beta}{2}\times\frac{d\sin\alpha}{dt}+e\frac{d\ (1-\cos\alpha)}{dt}\\&=\frac{1}{2}e\bar{\omega}_\beta\sin\alpha\sec^2\frac{\beta}{2}+e\bar{\omega}_\alpha\tan\frac{\beta}{2}\cos\alpha+e\bar{\omega}_\alpha\sin\alpha\end{aligned} \quad (5.6\text{-}7)$$

或
$$v=\frac{dS'_x}{dt}=\frac{ed\ (1-\cos\alpha)}{dt}=e\bar{\omega}_\alpha\sin\alpha \quad (5.6\text{-}8)$$

（3）锤头运动加速度

$$a=\frac{dv}{dt}=\frac{1}{2}e\bar{\omega}_\beta\frac{d}{dt}(\sin\alpha\sec^2\frac{\beta}{2})+e\bar{\omega}_\alpha\frac{d(\tan\frac{\beta}{2}\cos\alpha)}{dt}$$



$$+ e\bar{\omega}_\alpha \frac{\mathrm{d}\sin\alpha}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{2} e\bar{\omega}_\alpha \sin\alpha \tan\frac{\beta}{2} + \frac{1}{2} e\bar{\omega}_\alpha \bar{\omega}_\beta \sec^2\frac{\beta}{2}$$

$$+ \frac{e}{2} w_\alpha \bar{\omega}_\beta \cos\alpha \sec^2\frac{\beta}{2} - e\bar{\omega}_\alpha^2 \tan\frac{\beta}{2}\sin\alpha + e\bar{\omega}_\alpha^2\cos\alpha \quad (5.6\text{-}9)$$

或

$$a' = \frac{\mathrm{d}v'}{\mathrm{d}t} = e\bar{\omega}_\alpha \frac{\mathrm{d}\sin\alpha}{\mathrm{d}t} = e\bar{\omega}_\alpha^2\cos\alpha \quad (\mathrm{m/s^2}) \quad (5.6\text{-}10)$$

式中，$\bar{\omega}_\alpha$ 为偏心轴的角速度；$\bar{\omega}_\beta$ 为卧式径向锻造机的偏心轴滑块的角速度。

$$a' = e\bar{\omega}_\alpha^2\cos\alpha = e\left(\frac{\pi n_e}{30}\right)^2\cos\alpha \quad (\mathrm{m/s^2}) \quad (5.6\text{-}11)$$

3.3　径向锻造的变形功

变形功应等于变形力与在变形力方向上的变形距离的乘积

$$A_0 = PS_t \quad (5.6\text{-}12)$$

将前面的式（5.6-4a）和式（5.6-5）代入式（5.6-12），可得

$$A_0 = L_0 d\sigma_s \left\{1 + \frac{m\theta_0 l_0}{4\pi d}\sin\frac{\theta_0}{2}\left[e\sin\alpha\tan\frac{\beta}{2} + e(1-\cos\alpha)\right]\right\}$$

或 $$A_0 = L_0 d\sigma_s \left(1 + \frac{m\theta_0 l_0}{4\pi d}\right)\sin\frac{\theta_0}{2}\left[e(1-\cos\alpha)\right] \quad (5.6\text{-}13)$$

当 $\alpha = 90°$时，

$$A_0 = L_0 d\sigma_s \left(1 + \frac{m\theta_0 l_0}{4\pi d}\right)\sin\frac{\theta_0}{2}\left(e\tan\frac{\beta}{2} + e\right)$$
$$= L_0 d\sigma_s \left(1 + \frac{m\theta_0 l_0}{4\pi d}\right)\sin\frac{\theta_0}{2} e\left(\tan\frac{\beta}{2} + 1\right) \quad (5.6\text{-}14)$$

或 $$A_0 = L_0 d\sigma_s e\left(1 + \frac{m\theta_0 l_0}{4\pi d}\right)\sin\frac{\theta_0}{2} \quad (5.6\text{-}15)$$

对径向锻造机来说，最大打击一般是在 $\alpha = 18° \sim 20°$时，变形功的转角也是在 $\alpha = 18° \sim 20°$。

3.4　径向锻造机电动机功率计算

径向锻造机所消耗的功率 N（kW）应为

$$N = \frac{PV}{102\eta k} \quad (5.6\text{-}16)$$

式中，η 为传动系统的总效率，一般为 0.8～0.9；k 为飞轮对电动机功率的影响系数，参见表 5.6-3。

所以，$N = \frac{\sigma_s}{102\eta k}\left(1 + \frac{m\theta_0 l_0}{4\pi d}\right) l_0 d\sin\frac{\theta_0}{2} \times \frac{e\pi n_e}{1\,000 \times 30}\sin\alpha$

当 $\alpha = 20°$时

$$N = \frac{32\sigma_s}{1.02 \times 108\eta k}\left(1 + \frac{m\theta_0 l_0}{4\pi d}\right) l_0 d\sin\frac{\theta_0}{2} e n_e \quad (5.6\text{-}17)$$

另一种求解电动机功率的简化算法为：设 P_{max}为每一锤头所容许的最大锻造力，当 $P = mP_{max}$时，代入式（5.6-16）得

$$N = \frac{32 m P_{max} e n_e}{10^5 \eta k} = \frac{m P_{max} e n_e}{2.5 \times 10^2 k} \quad (5.6\text{-}18)$$

表 5.6-3　飞轮对电动机功率影响系数

径向锻造机锻造锻件的能力	k
< ϕ100	12～13
100～< ϕ200	7～12
200～< ϕ320	5～7
320～< ϕ550	3～5
550～< ϕ850	2～3

4　径向锻造的主要工艺参数

径向锻造的主要工艺参数为进锤速度，径向压下量、轴向送进速度、锻件转速以及坯料的加热温度等。

4.1　径向锻造的主要工艺参数

（1）进锤速度

进锤速度系指锤头在单位时间内移动的距离，亦就是单位时间内锻件在直径方向的减缩量。一般径向锻造机的进锤速度分快速、较快速、较慢速、慢速四种。在设备负荷允许的情况下，尽量选用较快速度。这既可以提高生产效率，又可以使锤头与锻件接触时间短，锻件不易降温。但对于锻高合金钢时，进锤速度太快，由于热效应作用，被锻部分温升较大，易于超出锻件加热规范，影响内在品质，所以要求考虑选用较低速度进锤。锻空心锻件时，采用较快的进锤速度，可使坯料径向压缩量大，轴向延伸量小。同时，因为进锤速度快，锤头与锻件接触时间少，锤头带走的热量也少，所以能使壁厚有所增加，但不明显。一般建议选用进锤速度为 4～7 mm/s 为宜。

（2）径向压下量

径向压下量是指锤头一次进给时，锻件在直径上的绝对缩减量。径向压下量主要与设备公称吨位、锻件材料、进锤速度、轴向送进速度和锻件表面品质有关。在设备负荷允许和满足锻件表面品质的前提下，应选用较大径向压下量。这样可以减小工步，提高生产率。也利于减小锻件尾部凹坑。但可能使锻件上出现螺旋形脊椎纹。锻打小直径段时，这种现象尤为明显。一台径向锻造机一次究竟能达到多大的径向压下量，应具体情况具体分析。材料的变形抗力大，势必影响压下量的加大。例如某单位的径向锻造机锻 ϕ28 mm 的钛合金，径向压下量为 10 mm，而锻同样直径的一般碳素结构钢和低合金钢，径向压下量可取 25 mm。较低的进锤速度和轴向送进速度的情况下可以选用较大的径向压下量。

（3）轴向送进速度

单位时间内夹头移动的距离，称为轴向送进速度。轴向送进速度也分快速、较快速、较慢速、慢速四种。轴向送进速度的大小，直接关系到生产率的高低和锻件表面品质的好坏。加大轴向送进速度，可显著缩短机动时间，提高生产率。一般情况下，在其他工艺参数不变的情况下，选用大的轴向送进速度，锻出的锻件表面品质较差。轴向送进速度也是影响锻件直径尺寸公差的一个重要因素。锻打变形抗力较大的材料和温度较低的工件，当轴向送进速度大时，锻出的锻件直径偏大，当轴向送进速度小时，锻出的锻件直径偏小。所以为了减小锻件直径尺寸公差，各件应尽可能保持用相同的轴向送进速度锻打。倘若坯料因某种原因使锻打温度已经很低，应特意采用较低的轴向送进速度锻打，这样可以保持锻件直径尺寸公差。选用轴向送进速度，应考虑到径向压下量、锻件转速以及设备能量的大小。径向压下量小、锻件转速大，可选用较大的轴向送进速度。反之，选用较低的轴向送进速度。有时径向压下量和锻件转速允许，但因设备能量较小，也不能采用很大的轴向送进速度。锤头锻打力为 1 600 kN的径向锻造机轴向送进速度建议按以下数值选用：①热锻时，一般工步选用 $V_{轴} = 2 \sim 3$ m/min，精整工步 $V_{轴} = 1 \sim 1.5$ m/min；②温锻时，$V_{轴} = 0.3 \sim 0.5$ m/min；③冷锻时，$V_{轴} = 0.06 \sim 0.2$ m/min。

（4）夹头转速

由径向锻造机的工艺原理可知，锻件旋转时，锤头在其周围锻打。当锤头接触到锻件的一瞬间，锻件短时间地被锤头“抱住”，夹爪停止转动。夹头不是匀速转动，而是有规则地一抖一抖转动。夹头的实际转速与理论计算的转速相比，并不降低。所以，夹头转速就等于锻件每分钟的转数。选择锻件转数这个工艺参数实际就是确定夹头的转速。径向



锻造机夹头的转速，一般为每分钟十几转到几十转。夹头转速影响锻件表面品质和生产率。

径向锻造机工作时，锤头每锻打一次，锻件即转动一个角度，因此，锤头在锻件上留下的锤痕也将互相错移一个角度。径向锻造机锻出的锻件外圆，呈多边形。但是因为采用了圆弧面锤头，再加上边数较多，因而多边形不太明显。多边形的边数事实上就是某一横截面在圆周上的锤击痕的数量，它是由锤头的打击次数和锻件的转数，即夹头转速所决定的。在锤头打击次数一定的情况下，锻件转数就决定了锻件边数的多少，而与锻件直径无关。夹头转速对锻件外表面品质的影响，就在于它对锻件边数的多少所起的作用。锻件边数越多，外表面就圆滑，表面品质也就越高。

径向锻造机夹头转速对生产率的影响较大。一般来说，夹头转速低，轴向送进速度也低。为了保证整形效果，不能采用较大的轴向送进速度，因而生产率低。所以在选择夹头转速时，应视锻件技术要求，在保证外表面品质的前提下，尽量选用较高的夹头转速，以配合采用较大的轴向送进速度，提高生产率。热锻直径小的锻件，过高的夹头转速有可能将锻件扭弯，宜选用较低的夹头转速。但是有的径向锻造机只有一种夹头转速，这时为了保证锻件品质，又要顾及生产率，就应选择合适的轴向送进速度。

（5）锻造温度

径向锻造机在进行锻打时，机动时间较短，锤头与锻件接触时间极短，锤头带走的热量很少，所以一般锻件的终锻温度较高。在确定锻打坯料锻造温度范围时，对于一般常见的钢材，可以只考虑始锻温度，而不管终锻温度。在设备能力和其他工艺参数允许的情况下，可以将始锻温度选得比一般锻造工艺低 100～150℃。这样可以使始锻温度低些，有利于提高锻件的力学性能和表面品质。径向锻造工艺也可采用温锻和冷锻。采用温锻和冷锻的目的是为了避免材料氧化，提高锻件精度，达到净形和近似净形加工（少无切屑加工）。同时，也提高了锻件的力学性能。

4.2 径向锻造的其他工艺参数

有的径向锻造机上还有如下其他工艺参数

1）分度。所谓分度就是夹头旋转至某一固定位置停止。这要根据设备说明书来确定，有的设备有 45°和 90°分度。送料机械手摆进后，夹爪需要在 45°位置，方能夹持方料的平面，因而这时需选用 45°分度动作。同时，在锻方形锻件后取料时，也需选用 45°分度。45°分度有：送料分度，取料分度，送取料分度和无分度，可在控制板上根据需要预选。

将方坯料锻成圆形锻件时，需在夹头旋转情况下，先锻方料的棱角，然后再锻成圆形截面，这时需要将夹爪处于 90°位置，因而这时上料需要选用 90°分度。若因夹爪或锤头影响不合适时，可增加位移，使夹爪处于其他位置上。

2）延时。锤头在调节到既定尺寸后，夹头不动，再继续在既定尺寸上多锻打一段时间称之为延时。其目的是能得到比较清晰，尺寸稳定的台阶。在进锤锻打工步一般均安排延时。

3）更正。更正是指夹头停止位置的控制。如果夹头要求准确无误地到达一定位置时，就需要配置更正挡块。往往夹头在停止位置时，还具有一定惯性，可能滑行一段距离。滑行距离往往难于确定，可能影响锻件轴向尺寸。

4）工件调头。当锻中间直径大，两端直径小的台阶轴锻件时，需要调头锻。调头锻往往是通过送料机械手将坯料翻转 180°后，夹爪夹住锻后的部分，再重新锻造尚未锻造的另一部分。

4.3 工艺卡片的编制

编制工艺卡片，是设计径向锻造工艺的最后一项工作。在设计锻件图、选择坯料和设计工艺装备等工作完成后，编排工艺卡片可以和确定变形过程（即工作循环）及选择工艺参数等工作同时进行。工艺卡片的内容可根据设备情况设计，其主要内容和注意事项如下。

1）零件名称、编号、材料，选用的坯料规格，坯料重量，锻件重量，工艺编号等。

2）确定工艺装备规格，编号。

3）画锻件图和工作循环示意图，填写锻件的技术要求。

4）计算送料位置尺寸，调头位置尺寸和下料位置尺寸。

5）计算各工步的夹头挡块放置尺寸，应注意三点：①第一锤进锤时，夹头位置比较重要，这关系到调头锻时的坯料分配。②锻件长度上的尺寸，除考虑热胀量外；锤头前部圆角对长度尺寸也有一定影响。图 5.6-18 中从 D_1 锻到 D_3 和从 D_2 锻到 D_3 夹头同样移动 L_1 距离，锻出锻件的长度则相差 L 长度。③锻带凹档锻件时，凹档长度为夹头运动距离、锤头整形段长度和预整形段长度之和。配置更正挡块时，应根据夹头运动速度恰如其分地选择程序挡块和更正挡块的距离。

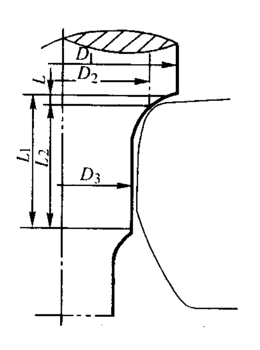


图 5.6-18 圆角对锻件长度的影响

6）计算各工步的锤头挡块放置尺寸。锤头的最小打击直径加上直径调节尺寸，即为锻件直径尺寸。如锤头打击直径（即锤头整形段设计锻造直径）为 60 mm，欲锻锻件直径为 ϕ85 mm，则锤头挡块位置在 25 mm 处。

7）标注出夹头旋转工步和延时、更正、分度、送料、取料和调头等工步尺寸或挡块位置。在锤头锻打的各工步，均需要夹头旋转。一般第一工步夹头送进时，即使锤头不锻打坯料，也需要夹头旋转。另外，根据设备具体条件，合理选择延时、更正、分度以及送料位置、取料位置和调头位置。

5 径向锻造的锤头、夹爪和芯棒的设计

锻件几何形状及尺寸确定以后，即可设计工艺装备。径向锻造机所需要的主要工艺装备有锤头、夹爪和芯棒等。

5.1 锤头

（1）锤头基本尺寸

1）锤头厚度。设计锤头的第一步是根据要求的最小打击直径来确定锤头厚度。每台径向锻造机固定锤头的基面（即偏心轴连杆滑块前端）到打击中心的最小距离（即偏心轴和偏心套均在前死点位置时），都为一个定值。如 ϕ120 mm的径向锻造机，该数值为 100 mm，根据所要求的最小打击直径，就可以确定锤头的厚度。计算式（见图 5.6-19）为

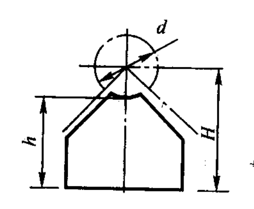


图 5.6-19 锤头的厚度

$$h = H - \frac{d}{2} \quad (5.6\text{-}19)$$

式中，h 为锤头厚度，mm；d 为要求的最小打击直径，mm；H 为固定锤头的基面到打击中心（坯料中心）的最小距离，mm。

每一个锤头厚度都相对应有一个最小打击直径。每台径向锻造机都有一个固定不变的打击直径最大调节量 Δ。一般采用偏心套调节机构。如 ϕ120 mm 径向锻造机的打击直径最大调节量 Δ 为 55 mm。最小打击直径加上直径最大调节量就是最大打击直径。所以锤头厚度确定以后，就确定了打击范围。例如 $H = 100$ mm。欲锻最小直径为 ϕ60 mm，则锤头厚度：$h = H - \frac{d}{2} = \left(100 - \frac{60}{2}\right)$ mm = 70 mm，该锤头的最大打击直径为 $d_{max} = d + \Delta = (60 + 55)$ mm = 115 mm。

2）锤头幅面形式。锤头幅面是与锻件直接接触的部分，其形状尺寸设计得是否合理，直接关系到锻件表面品质的优劣。一般锤头幅面由两部分组成，即由凹圆柱幅面构成的整形段和由凹圆锥面构成的预成形段。目前使用的锤头幅面形式有专用锤头幅面、特殊锤头幅面和通用锤头幅面三种，如图 5.6-20 所示。锤头幅面对锻件作用力的分析见图 5.6-21。图 5.6-20a 所示的专用锤头和图 5.6-20c 所示的通用锤头比图 5.6-20b 所示的特殊锤头有如下优缺点。

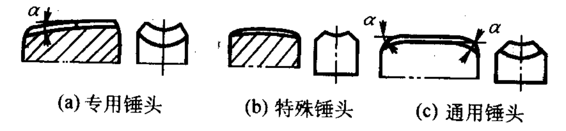


图 5.6-20 锤头幅面

优点：①坯料在一个较长的圆锥面上逐渐均匀而平稳地变形，有利于提高锻件表面品质；②使坯料从夹爪中脱去的轴向分力 P_2（如图 5.6-21）小，锻件不易脱落；③可增大一次压下量；④锤头与锻件接触面积大，外部摩擦阻力就大，打击力更容易深入心部。对于减少表面变形，提高锻件内部品质和减小尾部凹坑有利。

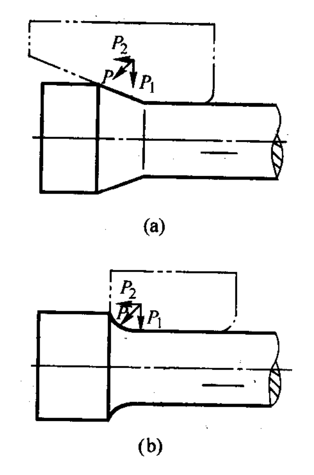


图 5.6-21 两种不同幅面锤头作用力的分析

缺点：①延伸率低，设备动力消耗大；②与锻件接触面积大，锤头温升快；③锻造带凹挡的锻件时不必要的敷料多。

图 5.6-20a 所示的专用锤头和图 5.6-20c 所示的通用锤头，有时在整形段两端设计有半整形段（如图 5.6-22a、5.6-22b）。这种形式锤头，可以有效地防止台阶处金属流向杆部而变细，并且使变形均匀，提高锻件品质。专用锻头适宜锻打各种台阶轴，一般仅用拉打，推打时压下量不宜太大。通用锤头，推、拉打均可采用，尤其适宜锻光杆轴。所谓推打与拉打如图 5.6-23 所示，坯料变形时，夹头逐渐远离锤头叫拉打；反之夹头逐渐靠近锤头，叫推打。

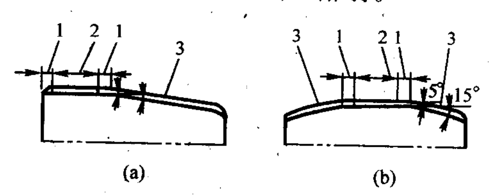


图 5.6-22 锤头结构

1—半整形段；2—整形段；3—预成形段

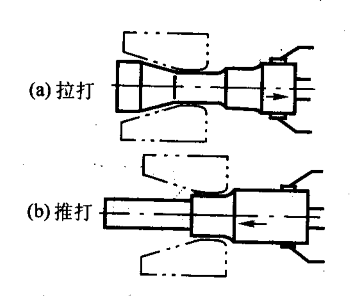


图 5.6-23 变形方式

3）整形段圆弧半径。整形段的横截面为凹圆弧状（图 5.6-24）。该处圆弧半径值的大小，对锻件表面品质影响很大。过小的圆弧半径在锻打时两侧首先啃入坯料（如图 5.6-24 双点划线所示），继续锻打时容易形成折叠。圆弧大了也不好。因为锻大圆坯料时，锤头圆弧与锻件圆弧能很好吻合，锻件表面圆滑，品质好；而锻小圆坯料时，二者不能很好吻合，锻件表面易出现多边形。因此，锤头整形幅面圆弧半径 R 取等于坯料半径 R' 或比坯料半径略大。一般取 $R = R' + \Delta$，Δ 取为 0～3 mm。

整形段幅面形式有图 5.6-25 所示的三种。图 5.6-25a 为常用的单圆弧幅面。整形效果好，锻件表面品质高，尾部凹坑缺陷较浅，但加工较复杂。图 5.6-25b 为双圆弧幅面，一般用于坯料直径比锻件最大直径大 30 mm 时使用。较大圆弧半径按坯料半径选取，较小圆弧半径按锻件最大半径选取。圆弧面平锤头用于薄壁管成形。图 5.6-25c 为平锤头。主要优点是加工简单，但所锻锻件表面品质比图 5.6-25a、图 5.6-25b 次之，尾部凹坑缺陷小，能满足一般锻件要求。

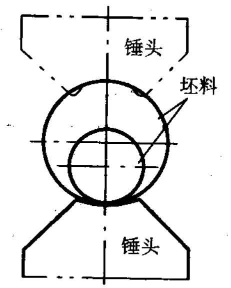
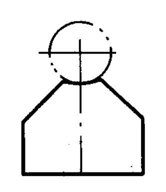
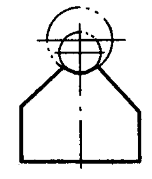
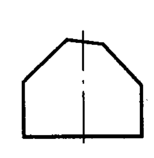


图 5.6-24 整形段锤头圆弧与工件的吻合情况







(a) 常用单圆弧面　(b) 双圆弧面　(c) 平锤头

图 5.6-25　锤头幅面形式

图 5.6-26 为锻锥形轴用的锤头整形段。这种锤头整形段除了有一段等圆弧幅面外，还包括一段与锻件锥度一致的锥形幅面。锥形幅面在锻锥形段时起整形作用，其他台阶则由锤头的等圆弧幅面整形。但在锻打初期刚刚进锤时，台阶过渡处会形成一小圈不必要的锥形敷料。有的工厂将锻造普通圆轴用的锤头工作表面改为平面形（图 5.6-27），但在整形幅面中间加工出宽约 10 mm，半径等于锻件最大半径的圆弧幅面，预成形段为一斜面。这种锤头的优点是加工制造容易，锤头的尺寸精度和几何形状精度容易保证。锻件外表面多边形轮廓的棱角高度小，可控制在锻件尺寸公差范围内。缺点只是锻件尾部凹坑较深。

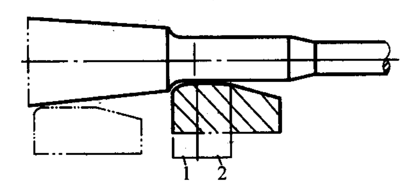


图 5.6-26　锻锥形轴用锤头的整形段
1—锥形幅面；2—等圆弧幅面

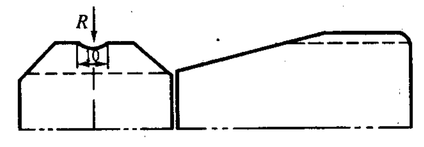


图 5.6-27　平锤头幅面

锻打厚壁管时，采用图 5.6-28 所示的平锤头结构比较合适。除增设精整段外，平锤头预成形段接近整形段处之锥角应比远离整形段处之锥角大 2°。此外，如果是四锤头精锻机，另一对锤头也可比这对锤头的锥角对应小 2°，如一对锤头为 15°、17°，另一对锤头则为 13°、15°。锻薄壁管时宜用圆弧形锤头，锻厚壁管不宜用。

芯棒与管坯的间隙大小要合适。一般说来，薄壁管取为 5 mm（单边），厚壁管取为 10 mm，最大不超过 15 mm（单边）。因此，毛坯变形可以分预锻（压塌）区、锻造区和精整区，如图 5.6-28 所示。

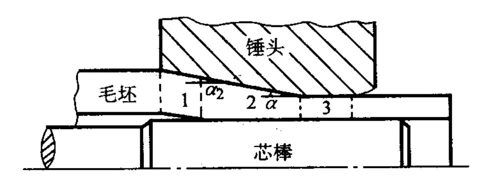


图 5.6-28　锻打厚壁管的锤头结构
1—预锻区；2—锻造区；3—精整区

对锤头来说，对应于毛坯变形的三个区可分别称为预锻区、锻造区和精整区。锻管锤头有两个明显特点：第一是把圆弧形改为平面形，不仅便于制造，而且有利于减少空心坯与芯棒的接触面；第二是两对锤头预锻区与锻造区间的 α_1、α_2 一般相差 2°。这样，热锻时每次变形总是按类似椭圆形方式进行，使芯棒与管坯在变形最大阶段处于一边接触另一边不接触或少接触状态。当然，芯棒与管坯在精整区便接触了，但这时变形量已很小，芯棒本身又有锥度，所以不存在抱卡芯棒问题。

4）整形段的长度。仅从整形效果看，整形段长度设计长一些好。但是如整形段过长，在锻打初期刚刚进锤时，参与变形的金属多，设备负荷大，延伸效率也低。另外，过长的整形段使锤头锻打时，连杆承受较大的偏心载荷。整形段长度与夹头还受到转速、轴向送进速度及锻件表面品质等因素的制约，一般取 30 ~ 70 mm。

5）锤头各处的圆角半径。锤头与接触金属的整个幅面上都不应有棱角。整形段上部棱角应倒圆，图 5.6-29 中为 R_1。尤其在推打时，R_1 值不小于半径上的最大压下量。但小圆角在拉打进锤时，使锻件台阶过渡处成形清晰，因为该处金属变形剧烈，容易变形，在单边压下量 15 mm，锤头上部圆角 R_1 = 5 mm 时，也未发现折叠，但锤头 R_1 处易发生破裂。锤头幅面两侧圆角 R_3 一般不小于 3 mm。锤头尾部圆角 R_2 一般取 5 ~ 10 mm。

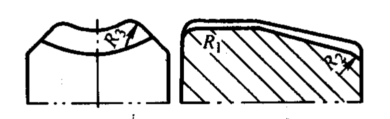


图 5.6-29　锤头的圆角

6）锤头的楔角。为了保证锤头在任何位置都不互相碰撞，四锤头径向锻造机锤头的楔角 β 为 90°（如图 5.6-30）；三个锤头的可取楔角 β 为 120°。同时必须保证在锤头进锤到最小位置时，相邻锤头侧面间隙 δ 为 1 ~ 2 mm。

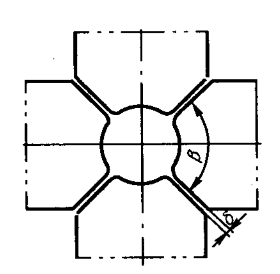


图 5.6-30　锤头楔角

7）成形幅面锤头。除了上述一般通用锤头的幅面形状外，遇到台阶短、台阶多、相邻台阶尺寸差又小的短空心件，或者外形有特殊形状要求的锻件，如弹体的缩口、无缝管轧机穿孔用顶头的成形、喷管的缩径等，都要设计相应的专用成形幅面锤头。

8）锻透性。锻透性的好坏可用式（5.6-20）表示，参见图 5.6-31。

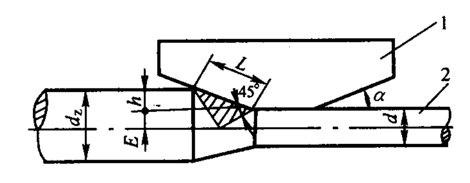


图 5.6-31　锻透性
1—锤头；2—坯料

$$E=\frac{\sqrt{2}}{2}\times L\sin\alpha\ (45°-\alpha) \quad (5.6\text{-}20)$$

式中，E 为锻透深度，mm；L 为锤头与锻件的接触长度，mm；α 为锤头的倾斜角，(°)。

从式（5.6-20）可知，接触长度越大，或进锤头的倾斜角越小，则锻透深度（E 值）越大。又因 $L=\frac{h}{\sin\alpha}$，式中 h 为锤头的压下量。因此，压下量 h 值越大，倾斜角 α 越小，L 值越大。这表明要想提高锻件中心部位的锻透性，就需要增大压下量，减小倾斜角（如图5.6-32）。尤其在锻一些高合金钢或锻透性要求较严的材料，设计锤头时一定要予以考虑。

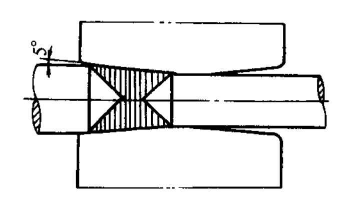


图 5.6-32 锤头倾斜角减小的锻打情况

（2）锤头尺寸公差和表面粗糙度

锤头装卡部位的具体形状和要求因不同的径向锻造机不同而异，应按径向锻造机锤头的安装空间尺寸设计。锤头厚度尺寸公差要求严，一般一组锤头的厚度差不大于 ±0.02 mm。一组锤头幅面应在专用夹具中同时进行最后精加工，尽量减小幅面几何形状的误差。锤头幅面的粗糙度 R_a 应小于 1.6~0.4 μm。粗糙度低，对于热锻，可减轻黏附氧化皮而将锻件表面打出螺旋形凹坑缺陷；对于冷锻，可减少锻件的表面粗糙度。

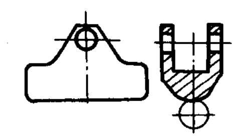
（3）锤头的材料和热处理

锤头在工作过程中，承受着高频率剧烈冲击载荷，热锻时还承受着高温，表面温度达 600℃，甚至更高。所以制作锤头的材料要有足够的强度、硬度和耐热性。一般热锻用的锤头材料可选用 5CrNiMo、5CrMnMo、3Cr2W8V 和 4Cr5W2VSi、H13 等。冷锻用锤头材料可选用一般冷模具钢，如 9CrSi、W6M05Cr4V2、6W6Mo5Cr4V 等。锤头的热处理硬度为 45~49HRC；冷锻用锤头硬度一般在 60HRC 左右。除使用整体锤头外，尚可采用以碳素结构钢作锤体，用合金焊条堆焊工作表面的锤头。堆焊层厚度一般为 5~8 mm。采用合金焊条堆焊也是整体锤头翻修常用方法。

5.2 夹爪

夹持锻件的夹爪可分为通用夹爪和专用夹爪。

（1）通用夹爪（图 5.6-33）



(a) 整体夹爪 (b) 夹爪体

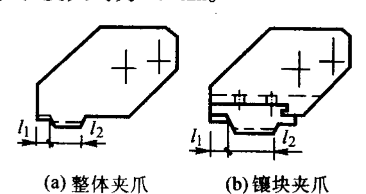
图 5.6-33 通用夹爪

通用夹爪适用于夹持圆、方坯料，有一定的夹持范围，只有坯料尺寸在夹持范围之内才可使用。夹持部分必须超过夹爪长度之半。由于夹头靠近锤头终止位置时，与锤头有一定的距离，所以相对应的这部分坯料锻不着。

（2）专用夹爪

一般阶梯轴，往往需要调头锻造时，需要对坯料两头夹持。而且坯料夹持部分直径常常不同，可能较短，因而需要根据锻件设计专用夹爪。

根据锻件形状尺寸，专用夹爪可以设计成整体式，也可以设计成镶块式。为了使坯料调头锻造和夹头运动到靠近锤头终止位置时，夹爪尽量靠近锤头，以便尽量在长度方向多锻造一部分，解决一些小件的锻造问题，设计了整体夹爪和镶块夹爪（如图 5.6-34）及夹爪体（如图 5.6-33）。整体夹爪和镶块夹爪的夹持部分尺寸都应按坯料直径设计。调头后的夹持部分尺寸，按被夹持锻件部分直径确定。为了防止夹料时两侧啃入坯料，圆弧半径要设计得比被夹持部位半径大，以大 2~5 mm 为宜。相应圆弧中心也向下移动同样的距离。为了防止工件夹持后打滑，在夹持坯料部位前端焊接不锈钢防滑台，长度大约为 20 mm。



(a) 整体夹爪 (b) 镶块夹爪

图 5.6-34 专用夹爪

夹持坯料长度 l_1 主要根据调头前夹持坯料长度和品质考虑，以夹持牢固为原则；调头后夹持部分长度 l_2 力求长些，但往往受定位器尺寸限制。一般建议 l_1 大于20 mm，l_2 大于 50 mm。夹爪固定部位应按机器夹头相应部位形状尺寸设计。设计夹爪时，在保证强度的前提下，应尽量将不用的部位铣空，这样不仅可以减轻重量，还容易散热。不论哪种夹爪，均开有防滑槽。

热锻夹爪长时间与热金属接触，温度高达 700℃左右。因此要求制造夹爪的材料要有足够的热硬性。热锻夹爪材料可以选用 5CrNiMo 和 5CrMnMo，热处理硬度 40HRC 左右。冷锻夹爪要高硬度，防止其急剧磨损使锻件打滑。冷锻夹爪材料可选用 T10、9CrSi 等，热处理硬度一般为 56~60HRC。

5.3 芯棒

对内孔形状尺寸要求不严的空心轴，可以采用自由缩径的方法成形。

凡是对内孔形状尺寸无法采用自由缩径保证的空心轴，其内孔成形要采用芯棒。采用芯棒锻造空心轴时，坯料外部用锤头锻打成形，内孔与芯棒靠实。

短芯棒锻管法采用推打，如图 5.6-35。夹头与芯棒在同一个方向，锤头闭合进行推打时，芯棒不沿轴向移动。一个夹头推打完后，转给另一个夹头进行拉打。锻件锻完后芯棒也就跟着出来了。

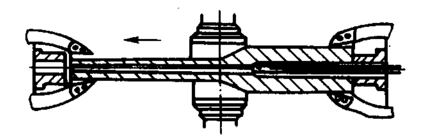


图 5.6-35 短芯棒上锻管

图5.6-36 所示为长芯棒锻管法。先将芯棒插入锻件，然后将芯棒和锻件一起送进锤头下面。闭合锤头后进行拉打。可锻成内部和外部都有台阶的空心轴，锻完拔出芯棒。有些设备允许使用长芯棒，设备本身带有拔芯棒装置。

为了使芯棒易于脱出锻件，在芯棒上设计必要的锥度。锥度的大小，应根据锻件长短、锻件壁厚大小、压下量大小和轴向送进速度几方面情况考虑。一般锻件较长、壁厚较



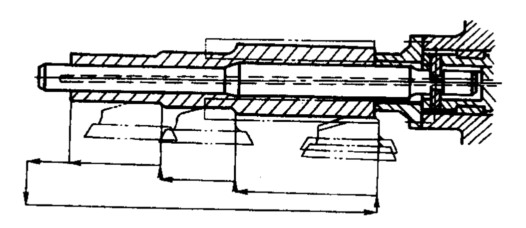


图 5.6-36　长芯棒锻造阶梯轴

薄、压下量大、轴向送进速度低，都对芯棒脱出不利。在这种情况下，芯棒锥度应取大些。反之，芯棒锥度应取小些。一般芯棒锥度以 1.5:100 为宜。热锻用芯棒反映了热锻件内腔尺寸，所设计芯棒直径和各台阶长度尺寸，应充分考虑热锻件的冷却收缩；冷锻薄壁管件或经过调质处理的坯料时，因为金属回弹，其数值要根据具体锻件采用计算机模拟确定，或试锻摸索。设计芯棒应很好地考虑金属流动特征。凡是锻件内孔有急剧的转角和过渡处，为了防止此处金属变形时不能很好地充满，应将内孔形状简化。用于热锻的芯棒，都应在芯部留水冷却孔。

如图 5.6-37 所示的回水形式的冷却水通道，比并列放两个管子（一个进水，一个出水）在芯棒内腔好。一般热锻芯棒材料用 3Cr2W8V、5CrNiMo 或 5CrMnMo，热处理硬度 46～50HRC，表面粗糙度 $R_a < 1.6\ \mu m$。形状复杂的冷锻芯棒材料用 Cr12MoV、W6M05Cr4V2、W18Cr4V；形状简单，尺寸较大的冷锻芯棒材料，用 CrWMn、GCr15 等，热处理硬度为 60～62HRC，表面粗糙度 $R_a < 0.4\ \mu m$。原则上芯棒的硬度越高越好，但是要防止脆断和高温下的软化。所以要求高的红硬性和韧性。最好在 5CrMnMo 钢上喷涂一层 VC 硬质合金。



图 5.6-37　一种回水形式的冷却水通道

6　径向锻造工艺的设计及其实例

6.1　径向锻造工艺的设计

（1）设计锻件图

1）首先了解径向锻造机及要锻造的产品。径向锻造机型号规格甚多，设计径向锻造工艺前，设计者应尽量熟悉设备后再设计锻件图。必须核对锻件的最大直径和长度、最多台阶数、相邻台阶的最小直径差、台阶的最短尺寸和直径调节量，对照设备的技术参数看是否在许可的范围之内。如果锻件直径差超出直径调节量时，就不能在该机上一火锻成。可以在下一火内更换锤头，再锻打形成直径尺寸较小的锻件。锻造中间带凹档的锻件（如图 5.6-38）时，由于锤头尺寸决定中间凹档不宜太短。如一般锤头整形段长度为 60 mm，还要考虑预整形段的影响，锻后锻件必定延长，因而凹档部分长度要兼顾考虑径向压下量。

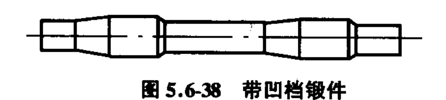


图 5.6-38　带凹档锻件

2）锻件公差及机械加工余量的确定。径向锻造机锻出的锻件尺寸精度较高，对于冷锻件和温锻件来说，只需根据零件的加工要求，适当留出磨削余量。某些零件甚至可不留机械加工余量。一般冷锻件可达到净形或近似净形（无切削或少切削）加工，即使是温锻件多半也达到净形或近似净形（无切削或少切削）加工。热锻时，由于有些不利因素的影响，如氧化皮清理不干净时外表面形成凹坑；锻打过程中锻件可能产生轴线弯曲和各台阶不同轴；加热时造成脱碳层；锻后热处理可能产生轴线弯曲以及机械加工特殊要求的工序间加工工艺留量不够等，因此，热锻件必须留有一定的机械加工余量。影响锻件轴向尺寸公差的原因是坯料的加热温度不一致，锻后冷却收缩量不一致。锤头上部圆角变形，也是影响轴向尺寸公差的一个因素。因此锤头使用时间长了，必须调整控制轴向尺寸的挡块位置。挡块共有 16 个，一般位于板式控制机构的 16 个直槽槽格（有的径向锻造机多到 36 个，包括 24 个夹头挡块槽格，12 个锤头槽格）之中，每块挡块仅用一个 M8 螺钉固定，调整时借助于标尺将挡块移至一定的位置以后予以固紧，从而分别实现有关工艺要求。一般来说，锻件越长，直径越大，锻件越容易弯曲。形状越复杂的锻件，如细长件、带凹档件和相邻台阶直径尺寸相差较大的工件，都容易弯曲。几件在一起连锻，其公差及机械加工余量可按单件考虑。需要调头锻的锻件，因为两次装夹，调头前后两段有可能不同轴，其机械加工余量应适当增大。

一般径向锻造机锻空心轴坯，坯料选用无缝管，因径向锻造机本身不能穿孔。由于无缝管坯的壁厚尺寸公差较大，锻造时，随着管坯原壁厚经锻打而变薄时，壁厚差可相对减小，但不能彻底纠正。这是因为芯棒在管坯内呈浮动状态，并不能在理想中心刚性支承顶住。管坯一边金属靠着时，它就会被少量推向管坯的另一边，待两边金属都靠实了，原来管坯壁厚较厚的一边，锻后仍然较厚。管坯较薄的一边，锻后仍然较薄。这样就造成了锻件内外径不同心。空心轴内孔不易加工，在机械加工时，往往以内径作基准粗车外圆，所以空心轴的内径机械加工余量要小些。在径向锻造机上批量生产的直径不大于 200 mm，长度不大于 2 000 mm 的热锻钢质轴类（实心、空心、台阶轴、光轴）锻件，分别按表 5.6-4、表 5.6-5、表 5.6-6（引自 JB 4348—87）确定，具体几何尺寸参见图 5.6-39、图 5.6-40。

径向锻造机上钢质轴类锻件公差及机械加工余量的确定，一般应按照下列原则。

① 热锻钢质轴类锻件夹持部分（未锻部分）直径 D 的机械加工余量按 GB 908—72《锻制圆钢和方钢品种》选择，并允许增加 1～2 mm，但夹持部分的印痕深度不得超过单面最小机械加工余量的 1/2。

② 锻件端部切头后，不允许有裂纹、缩孔。锻件表面出现的棱角、裂纹、螺旋凹坑、鱼鳞斑等缺陷深度不得超过单面最小机械加工余量的 1/2。

③ 其余技术条件按 GB 12361—1990《钢质模锻件通用技术条件》执行。

④ 热锻钢质轴类锻件的非加工表面直线度按 GB 12362—1990《钢质模锻件公差及机械加工余量》表 5.6-4 执行。

⑤ 热锻实心轴类锻件公差及机械加工余量（见图 5.6-39）按表 5.6-4 规定。a）表 5.6-4 适用于表面粗糙度 R_a = 1.6～6.3 μm 的锻件。如表面粗糙度 R_a > 1.6～6.3 μm 时，数值仅供参考。b）调头锻的轴类锻件，其机械加工余量应比表 5.6-4 规定的余量增加 0.5～2 mm。

⑥ 热锻实心黑皮锻件尺寸公差按表 5.6-4 查定。

⑦ 热锻空心轴类锻件公差及机械加工余量参见图 5.6-40：a）热锻空心轴类锻件的轴向（内外）公差及机械加工余量按表 5.6-4 确定。b）热锻空心轴类锻件的径向（内外）公差及机械加工余量。外径公差及机械加工余量按表 5.6-5 确定。内径公差及机械加工余量按表 5.6-6 确定。c）热锻空心轴类锻件，内孔可采用芯棒控制，芯棒斜度一般定为 1:100～1:250。

表 5.6-4 热锻实心轴类锻件公差及机械加工余量

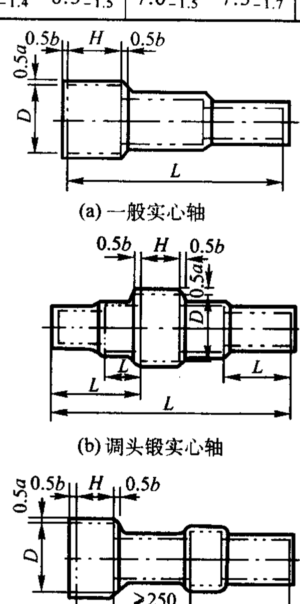
零件长度 L/mm	零件最大直径 D/mm							
	30 ~ 80		80 ~ 100		100 ~ 120		120 ~ 200	
	余量 a、b 与公差							
	a	b	a	b	a	b	a	b
0 ~ 400	$3.5^{+0.8}_{-0.4}$	$4.5^{+1.5}_{-0.8}$	$4.0^{+0.9}_{-0.5}$	$5.0^{+1.6}_{-0.8}$	$4.5^{+1.0}_{-0.5}$	$5.5^{+1.8}_{-0.9}$		
400 ~ 800	$4.0^{+0.9}_{-0.5}$	$5.0^{+1.6}_{-0.8}$	$4.5^{+1.0}_{-0.5}$	$5.5^{+1.8}_{-0.9}$	$5.0^{+1.2}_{-0.6}$	$6.0^{+2.0}_{-1.0}$	$5.5^{+1.3}_{-0.6}$	$6.5^{+2.2}_{-1.1}$
800 ~ 1 200	$4.5^{+1.0}_{-0.5}$	$5.5^{+1.8}_{-0.9}$	$5.0^{+1.2}_{-0.6}$	$6.0^{+2.0}_{-1.0}$	$5.5^{+1.3}_{-0.6}$	$6.5^{+2.2}_{-1.1}$	$6.0^{+1.4}_{-0.7}$	$7.0^{+2.3}_{-1.2}$
1 200 ~ 2 000			$5.5^{+1.3}_{-0.6}$	$6.5^{+2.2}_{-1.1}$	$6.0^{+1.4}_{-0.7}$	$7.0^{+2.3}_{-1.2}$	$6.5^{+1.5}_{-0.7}$	$7.5^{+2.4}_{-1.2}$

表 5.6-5 热锻空心轴类锻件外径径向公差及机械加工余量

坯料壁厚 k/mm	零件总长度 L/mm					
	0 ~ 500		500 ~ 800		> 800	
	零件最大直径 D/mm					
	0 ~ 80	> 80	0 ~ 80	> 80	0 ~ 80	> 80
0 ~ 10	$4.0^{+0.9}_{-0.4}$	$4.5^{+1.0}_{-0.5}$	$5.0^{+1.1}_{-0.5}$	$5.5^{+1.2}_{-0.6}$	$6.0^{+1.4}_{-0.6}$	$6.5^{+1.5}_{-0.7}$
10 ~ 20	$4.5^{+1.0}_{-0.5}$	$5.0^{+1.0}_{-0.5}$	$5.5^{+1.2}_{-0.6}$	$6.0^{+1.4}_{-0.6}$	$6.5^{+1.5}_{-0.7}$	$7.0^{+1.6}_{-0.7}$
> 20	$5.0^{+1.1}_{-0.5}$	$5.5^{+1.2}_{-0.6}$	$6.0^{+1.4}_{-0.6}$	$6.5^{+1.5}_{-0.7}$	$7.0^{+1.6}_{-0.7}$	$7.5^{+1.7}_{-0.8}$

表 5.6-6 热锻空心轴类锻件内径径向公差及机械加工余量

坯料壁厚 k/mm	零件总长度 L/mm					
	0 ~ 500		500 ~ 800		> 800	
	零件最大内径 d/mm					
	0 ~ 80	> 80	0 ~ 80	> 80	0 ~ 80	> 80
0 ~ 10	$5.0^{+0.5}_{-1.1}$	$5.5^{+0.6}_{-1.2}$	$6.0^{+0.6}_{-1.4}$	$6.5^{+0.72}_{-1.5}$	$7.0^{+0.7}_{-1.6}$	$7.5^{+0.8}_{-1.7}$
10 ~ 20	$5.5^{+0.6}_{-1.2}$	$6.0^{+0.6}_{-1.4}$	$6.5^{+0.7}_{-1.5}$	$7.0^{+0.7}_{-1.6}$	$7.5^{+0.8}_{-1.7}$	$8.0^{+0.8}_{-1.8}$
> 20	$6.0^{+0.6}_{-1.4}$	$6.5^{+0.7}_{-1.5}$	$7.0^{+0.7}_{-1.5}$	$7.5^{+0.8}_{-1.7}$	$8.0^{+0.8}_{-1.8}$	$8.5^{+0.9}_{-1.9}$



(a) 一般实心轴

(b) 调头锻实心轴

(c) 带凹档实心轴

图 5.6-39 实心轴类锻件

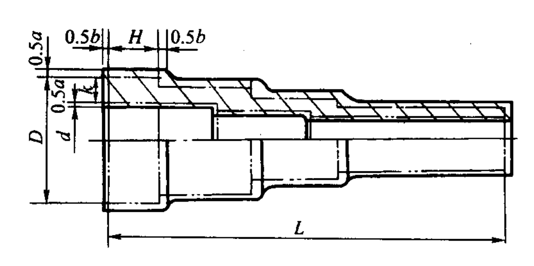


图 5.6-40 空心轴类锻件

⑧ 各台阶的公差及机械加工余量，均按零件最大直径 D（或 d）及总长度 L 选用。

3）工艺附加部分和工艺敷料。一个典型的径向锻造机锻造的坯料，除了锻件本身外，还包括有夹持部分、尾部料头、两件以上连锻时的锯口、特殊要求的试样等工艺附加部分以及工艺敷料。

① 夹持部分。供夹爪夹紧坯料的夹持部分，可作为锻件的一部分单独考虑。确定夹持部分的长度，应保证易于夹紧、夹正，而坯料表面又不致于被夹出深的压痕。一般情况下，夹持部分长度应不小于夹持直径之半。在夹持部分作为锻件的一部分，而且锻件长度又允许时，尽可能夹持长些。如果夹持部分不能作为锻件的组成部分，在锻后作为料头锯掉时，应尽可能避免浪费。例如有时可将夹持部分锯下作为另一种锻件的坯料。用芯棒锻打空心锻件，当管坯料经锻细而紧箍在芯棒上时，可以防止锻件脱落，此时夹持部分的长度只需考虑压痕不要太深。热锻薄壁空心件时，为防止将坯料夹扁，夹持部分的长度应取长些。也可将夹持部分水冷，或者设计专用弧形钳口。如用芯棒锻打薄壁空心件，即使夹持段并不需要靠芯棒成形，此时也应设计有较大直径的芯棒，以免坯料被夹变形后芯棒不能脱卸。

② 尾部料头。随着锻造比的大小不同以及锻造温度的高低，径向锻造机锻造的坯件尾部呈现凸出或凹入状态，形状很不规则，难以控制。多数锻件的尾部呈现向内凹陷，称为尾部凹坑（或凹心）。在小吨位的径向锻造机上，锻件尾部凹坑深度达 20 ~ 25 mm，一般较好的锻件尾部凹坑深度为 3 ~ 5 mm。除了尾部形状不规则以外，锻件多余的料全部延伸到尾部，致使尾部长度尺寸相差很大。还有在径向锻造过程中润滑油的压力和液压油的温度是变化的，也影响到轴向尺寸。此外，长锻件的温度分布不均匀，收缩量也不一致。基于上述原因，锻件都得将尾部锯掉后进行机械加工。料头长度最短应大于锯口宽度 3 ~ 5 mm，一般可取 15 ~ 25 mm。

③ 试样。特殊要求的锻件，需附带力学性能试验用试样。试样一般预留在尾部，其长度为试样长加一个锯口宽度。

④ 锯口。有些短工件，在径向锻造机上锻造，可以视具体情况，采用两件以上合在一起连锻。以便减少夹持部分和尾部料头损失，节省辅助时间。几件在一起连锻，相互之间应留出一个锯口宽度。

⑤ 工艺敷料。径向锻造工艺敷料都是由所用的锤头及芯棒形成的。相邻台阶过渡处的圆角（如图 5.6-41 所示），系锤头锻打时形成，与所用锤头整形段上部圆角相同，在各处均为同一数值。锻打带凹档的锻件时，在小直径往大直径过渡处，有一段与锤头尾部锥度一致的锥形过渡段。锻打带锥度的直台阶轴，在大直径往小直径过渡处也有一段与锤头上部锥度一致的锥形过渡段。空心锻件内孔靠芯棒成形，为便于脱出芯棒，一般都将芯棒设计成具有一定的锥度，锻件内孔也会形成敷料。设计锻造毛坯时，还应考虑锻件调头前及调头后夹持位置的空间距离，如调头后台阶太短而使夹爪夹料受到妨碍时，或者无定位基准时，应增设敷料。

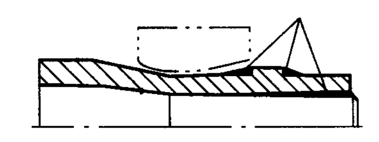


图 5.6-41　工艺敷料

4）绘制锻件图。根据零件的形状尺寸和工艺分析确定机械加工余量及工艺敷料后，即可绘制锻件图。绘制锻件图一般有如下要求。

① 锻件外形用实线画出，在锻件轮廓内用双点划线表示零件形状。

② 尺寸线上面标注锻件尺寸，尺寸线下面括弧内表示零件尺寸。

③ 轴向尺寸的尺寸引线，应标在台阶清晰的地方，并以基准面标出。

④ 标出凹档长度，以免由于各台阶长度尺寸积累误差过大而使产品报废。

⑤ 标注对锻件的技术要求。

具体绘制方法如图 5.6-42 所示。

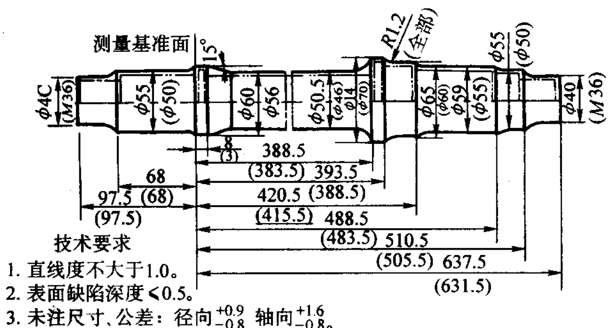


图 5.6-42　轴类锻件图

6.2　坯料

除带有轴向附加力的径向锻造机外，一般径向锻造机锻造变形只能由粗变细。径向锻造实心台阶轴，有锻造比要求或与其他设备联合锻造时，需要根据具体要求选用坯料，一般坯料直径等于或稍大于锻件最大直径（或边长）。头部带有法兰盘的锻件，采用镦粗比不大于 3 时，可根据杆部最大直径尺寸选用坯料直径，保证头部镦锻成形时的锻件品质。径向锻造空心件的坯料应选用管料。选择管坯尺寸时，首先以锻件图上靠芯棒成形部分的内径最大尺寸为依据，确定管坯内径。为保证芯棒自由投入，管坯的内径至少应比芯棒最大直径大 1～2 mm。如果是薄壁管，可为 5 mm，如果是厚壁管，可为 10 mm，最大不超过 15 mm。其次确定管坯壁厚。根据锻件的最大壁厚尺寸，适当考虑管坯缩径时横截面积必定减小和壁厚略有增加的规律，确定管坯壁厚。自由缩径时影响壁厚的增加和横截面面积减缩率的因素有：① 坯料变形抗力的大小；② 坯料在锻打过程中的延伸率；③ 送进方式，等等。坯料的变形抗力与原材料含合金元素量及始锻温度的高低有关。原材料含合金元素多，始锻温度低，变形抗力就大。延伸率则与压下量和锤头斜度大小有关。压下量大和锤头斜度大，都使坯料的延伸率大。一般情况下，材料变形抗力大和锻打时的延伸率大，将导致壁厚增加量减小，横截面面积的缩减率则增大；反之，原材料变形抗力小，压下量适度和锤头斜度小，则壁厚增加量大，而横截面面积的减缩率会小。径向送进（进锤锻打）和轴向送进（夹头移动）相比，径向送进时，壁厚增加量要稍大些。图 5.6-43 是材料为 40CrNiMoA 的 ϕ102 mm × 23 mm（外径 × 壁厚）无缝钢管自由缩径锻打到不同外径时的壁厚变化曲线。从图中可以看出，这个规格的管坯在外径锻到 ϕ72 mm 时，壁厚从 23 mm 增厚到 28.5 mm，以后随着外径的减小，壁厚也随着减小。外径锻至 ϕ45 mm 时，内孔基本上与原先管坯内径相当。

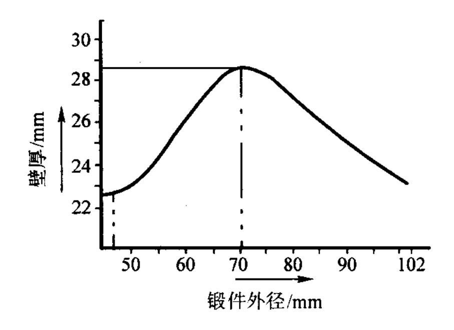


图 5.6-43　管坯自由缩径壁厚变化曲线

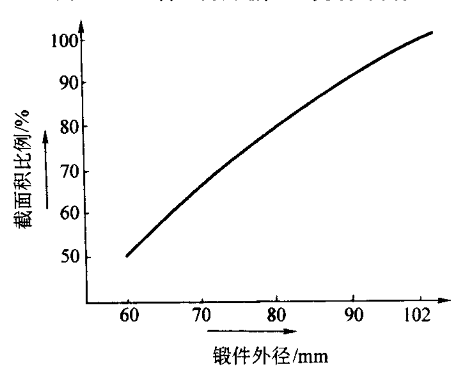


图 5.6-44　管坯自由缩径横截面面积减缩率

图 5.6-44 是材料为 40CrNiMoA 的 ϕ102 mm × 23 mm 无缝钢管在自由缩孔时锻打到不同外径时横截面面积的减缩率。管坯被锻到一定的外径，所选管坯的横截面面积必须大于该处锻件的横截面面积，否则锻件内孔将充不满。必须说明的是，有时由于锻造工艺选择不合适，相连的两个内孔直径相差较大，管坯在芯棒直径较大的一段被锻，横截面面积减小，锻件内孔不易充满。这可能因为锻造时多余金属下滑，给下一段提供的是已经经过减缩的坯料，不一定就是管坯选择不合适。如果壁厚和外径尺寸允许，可以有意选用较大内径的坯料，在锻打时坯料缩径，在未与芯棒接触时，内表面氧化皮自动脱落，可以得到较为光滑的内表面，内孔加工余量可以减小。当锻件尺寸精度要求较高，机械加工余量小时，可以选用冷定心法穿孔的无缝钢管作为坯料。冷锻或温锻件的管坯均可以选用冷拔钢管。管坯的选择，都要经过试锻或计算机模拟后试锻，方可大批投入生产。坯料的规格确



定以后，可以根据体积不变的原则，计算所需要的坯料质量，计算方法与一般锻造计算方法相同。它包括根据锻件图计算出的锻件和各附加部分及工艺敷料的质量，再加上火耗。确定火耗的大小，应视加热条件而定，一般取用料质量的2%～3%。由于径向锻造用的坯料及装夹时需要轴向定位，坯料要保持一个端面平直，宜用锯床或切管机下料。表5.6-7所示为某中空管在生产纲领相同，冶炼方法相同但坯料不同、工艺不同时的材料利用率和工厂成本（1981年）。

表 5.6-7

工艺 / 项目	钢锭＋水压机锻造＋粗加工钻孔＋热处理	钢锭＋径向锻造＋钻孔＋热处理	钢锭＋水压机开坯＋粗加工钻孔＋加热＋径向锻造＋热处理	铸自耗电极＋电渣重熔＋粗加工钻孔＋加热＋径向锻造＋热处理
锭重/t	3.7	2.7	3.12	2.5
材料利用率/%	22.9	31.4	27	33.9
工厂成本/元	5 784.1	5 778.4	6 635.1	6 618.3

从表5.6-7可以得出以下结论。

1）对于大型径向锻造机来说，在其开口尺寸允许范围内可采用钢锭直接锻造，不须经水压机开坯。

2）径向锻造中空管尽量不采用钢锭—水压机开坯—粗加工钻孔，然后径向锻造的工艺路线。如有特殊强度要求，可采用电渣重熔—粗加工钻孔，然后径向锻造的工艺路线。对于石油钻铤这样的产品，则可采用钢锭—径向锻造机开坯—粗加工钻孔，然后径向锻造成形的工艺路线。

6.3 变形过程

由于径向锻造的变形方式是多头螺旋式延伸，坯料径向被压缩，轴向伸长。各台阶逐段成形，变形过程主要就是各台阶的成形顺序。编制径向锻造工艺的变形过程，实际上就是确定径向锻造机的自动控制过程。由于径向锻造机夹头和锤头的送进动作构成了程序自动控制的循环过程，因而编制径向锻造工艺的变形过程，就是确定夹头和锤头的送进动作，即编制工作循环示意图。

（1）工作循环示意图

工作循环示意图以实箭头表示，在箭头旁标注工步顺序号。坯料不变形而夹头或锤头仍作送进动作的过程也用实箭头表示。垂直于锻件轴线的箭头，表示锤头作径向进给的方向；平行于锻件轴线的箭头，表示夹头作轴向送进的方向。图5.6-45为工作循环示意图的举例。为便于理解，图旁画有坯料变形过程的示意图。

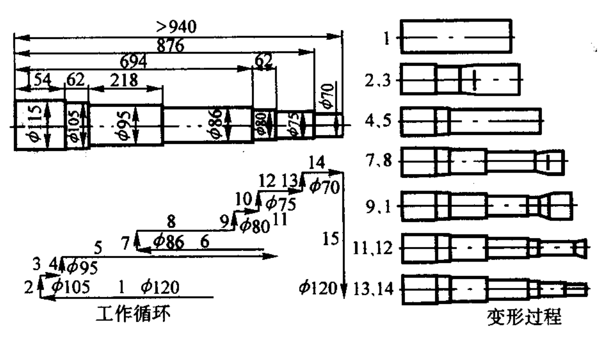


图 5.6-45 工作循环示意图

（2）拉打和推打

拉打与推打相比，有如下几个优点。

1）锻件不易弯曲。拉打时，靠近锤头部分先成形。一直到最后锻件的全部成形过程是在夹头的旋转中心与锤头打击中心重合的轴线上拉着进行的，造成锻件弯曲的不利因素（如坯料夹持不正、坯料横断面上温度不均、锤头整形段长度不一致等）的影响很小，仅仅在最后对尚未成形的尾部影响较大，这时尽管尾部有偏摆，也不能使已经成形的锻件弯曲，如图5.6-23a所示。推打是尾部先成形，如图5.6-23b所示，在成形过程中的每一阶段。已成形部分在脱离锤头整形段后，处于不受限制的自由状态，容易造成锻件弯曲。

2）锻件轴向尺寸稳定。拉打时，按照所需要的锻件各段尺寸逐段成形，夹头移动距离直接反映出热锻件的长度尺寸，多余的料全部延伸到尾部。推打时因尾部先成形，夹头的移动距离小于热锻件长度，根据该段锻件的体积，计算所需坯料的长度尺寸。虽然夹头移动同样距离，但是由于坯料体积误差，造成锻件的轴向尺寸不一。例如按坯料公称直径尺寸计算出坯料的长度，也就是夹头送进需要移动的距离。但坯料外径比公称直径大时，锻出的锻件长；坯料外径比公称直径小时，锻件就短。

3）可加大一次压下量。拉打时对坯料的轴向分力 P_2 与夹头运动方向相逆，金属延伸顺利，如图5.6-46b所示。增大压下量，该分力有使坯料从夹爪中脱出的倾向，而对夹头的运动无不利影响。另外，拉打的锤头尾部锥面较长，一次压下量可以稍大。推打时，轴向分力 P_2 的方向与夹头运动方向相向，如图5.6-46a所示。随着压下量的加大，轴向分力 P_2 也增大，到一定程度时会引起夹头上下抖动，造成锻件弯曲。故推打时只宜采用小压下量。推打与拉打混合使用，可以减少工步，减轻拉打工步的负担。在刚开始锻打时，采用小压下量推打，也是一种自行清理氧化皮的好方法。锻冷锻件和不易夹住的坯料（如难熔金属钼棒加热温度很高，表面摩擦很小），为了防止坯料从夹爪中脱出，采用推打较合适。用短芯棒锻细长等内径的空心件，也以采用推打为宜。

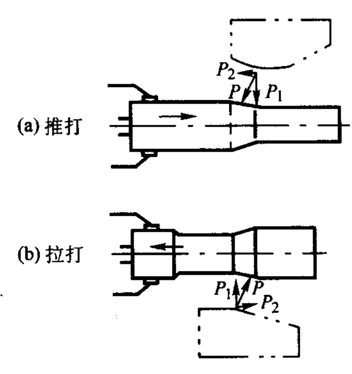


图 5.6-46 推打与拉打的作用

（3）多道次成形

确定变形过程时，如果锻件相邻直径尺寸相差较大，也就是坯料的总减缩量较大时，如采用一次压下，设备有可能超载，锻打台阶时，容易捋皮，锻出的台阶不清晰。此时，可以分两次或多次进锤锻打。如图5.6-45中5工步，将 ϕ95 mm的坯料锻到 ϕ86 mm、ϕ80 mm。也可以按图5.6-47确定分次进锤锻打。

6.4 工艺实例

（1）一般锻件

1）图5.6-47中所示锻件，为中间大两端小，需要安排调头锻的典型实心台阶轴。选用1 600 kN锻造力的径向锻造设备。锻打时使用打击范围为 ϕ115～35 mm的专用锤头。夹爪可夹持坯料部分直径为 ϕ100 mm，长度 l_1 = 20 mm；

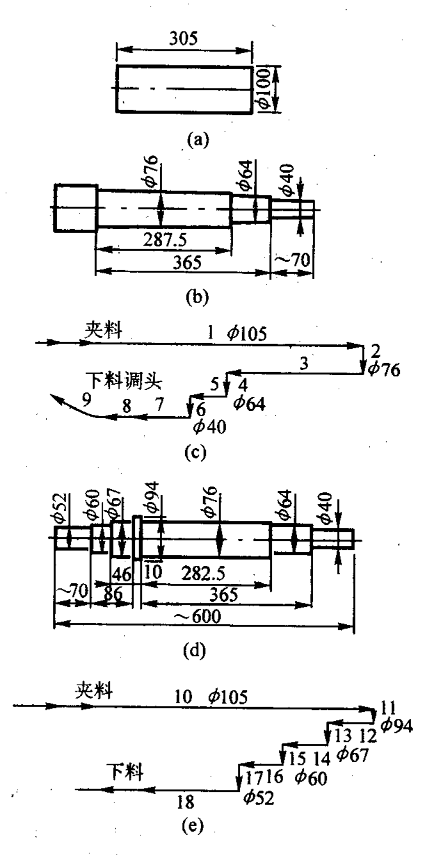


图 5.6-47　需要调头锻的台阶轴

调头后可夹持坯料部分直径为 ϕ64 mm 段，长度 $l_2 = 60$ mm 的专用镶块夹爪。锻造该台阶轴所使用的锤头、夹爪和定位器如图 5.6-48、图 5.6-49 和图 5.6-50。

专用镶块夹爪夹持着坯料 ϕ100 mm × 305 mm，先将 ϕ100 mm 坯料锻到 ϕ76 mm，再从 ϕ76 mm 逐台阶锻造。调头后夹爪夹持着已锻部分 ϕ64 mm 台阶段，先锻 ϕ94 mm，然后再锻到 ϕ67 mm、ϕ60 mm 和 ϕ52 mm 台阶。选用的工艺参数为

进锤速度：$v_{径} = 4 \sim 5$ mm/s；

轴向送进速度：$v_{轴} = 2$ m/min；

锻件转数：$n = 41$ r/min；

始锻温度：$t = 1\ 100$℃；

工件材料：20CrMnTi。

2）图 5.6-51 是一个锥度和台阶混合的实心轴。坯料选用 ϕ115 mm 圆钢。采用通用夹爪夹持坯料，锻打时采用自大头处进锤并用拉打方式成形。

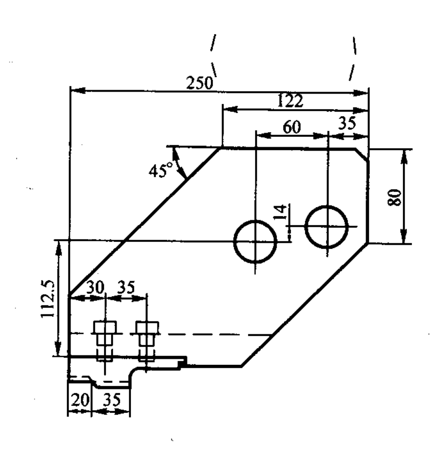
采用锥度板如图 5.6-52 所示。每台径向锻造机的锥度板曲线固定不变。所谓锥度板曲线，就是用数字表示出直径调节从零至最大调节量之间的各个位置上锥度板弯曲中性线展开长度后，连结各点所形成的曲线。

① 锤头打击范围选为 ϕ115 ~ 60 mm。

② 确定该件的直径调节范围。因为锤头的打击范围是根据锤头最厚的圆柱形来确定的，锻打该件的锤头锥形幅面长度取为 45 mm，锥形段锥度 1:15，圆柱幅面部分锻到 ϕ112 mm 时，最上部锥形幅面即可锻到 ϕ115 mm。所以锻打该件的直径尺寸是从 ϕ112 mm 至 ϕ92 mm，直径的调节范围为 ϕ52 ~ 32 mm。

③ 将锥度段 300 mm 等分成 52 ~ 32 的 20 个间隔。

④ 国产 ϕ120 mm 径向锻造机的锥度板曲线如图 5.6-53 所示。



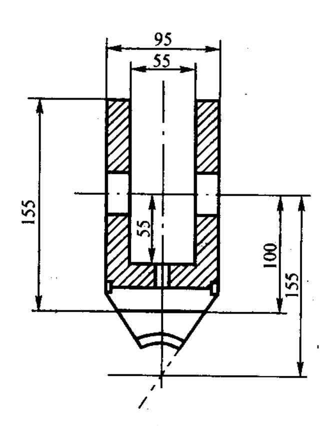


图 5.6-48　二轴锤头图

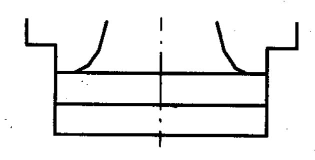


图 5.6-49　二轴夹爪图

锻这根轴采用图 5.6-54 所示的锤头。为了锻打 1:15 段，锤头整形幅面上部一段为锥度 1:15 的整形段，中部为凹圆弧整形幅面，用于其他台阶的整形。因为锤头上部有一段锥形整形幅面，所以在以下各台阶过渡外，均留有一段与锤头锥度一致的敷料。

工作循环中，第3 工步在夹头运动的同时锤头进锤，依靠锥度板控制夹头送进 15 mm、锤头进 1 mm 的送进规律。先选择该工步的送进速度，应保证夹头每送进 15 mm，锤头送进大于 1 mm，以免锤头滞后而影响锻件尺寸。建议先用 $v_{轴} = 1.5$ m/min，$v_{径} = 3$ mm/s。第 3 工步锻完锥度段，即夹头离开锥度板后，依靠事先布置的挡块控制锻件直径，将其余部分锻出。其工艺参数同上例。

3）厚壁管缩口。坯料选用 ϕ73 mm × 17 mm 无缝钢管，设计专用成形锤头（图 5.6-55），内孔成形采用芯棒。工作循环简单。先将锤头进到所需要位置，四个锤头构成一个成形模。夹头轴向进给时，推打成形，管坯逐渐缩口，第 2 工步完成。整个锻件成形结束后，夹头返回。缩口后，ϕ28 mm头部内孔已经堵实。

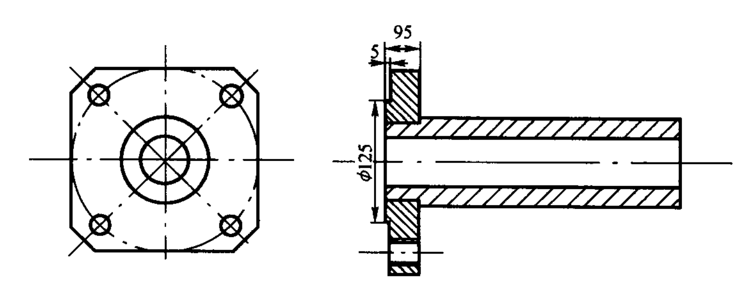


图 5.6-50　二轴定位器图

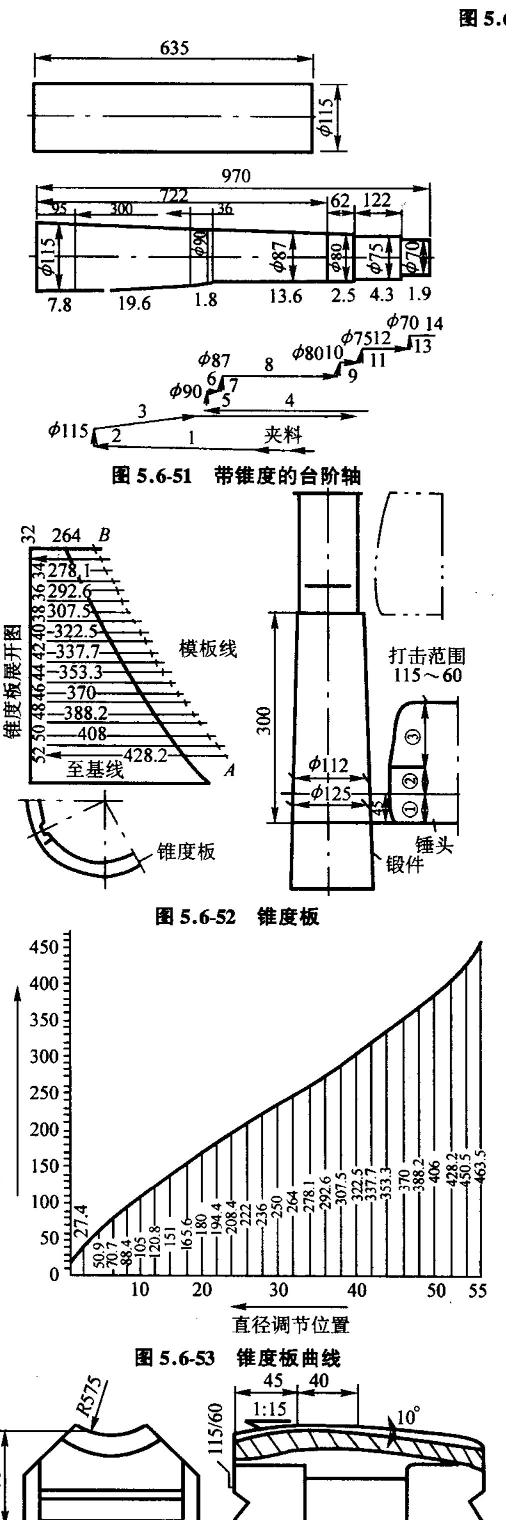


图 5.6-51　带锥度的台阶轴

图 5.6-52　锥度板

图 5.6-53　锥度板曲线

图 5.6-54　锥度轴专用锤头

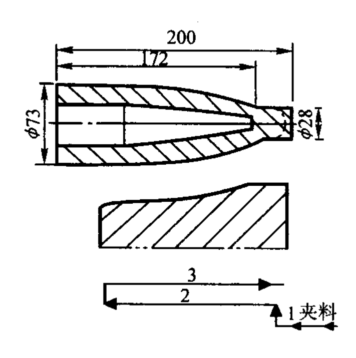


图 5.6-55　厚壁管缩口专用锤头

选用的工艺参数：

锻件转数：　　$n = 25$ r/min；

轴向送进速度：　　$v_{轴} = 1$ m/min；

锻造加热温度：　　$t = 100$℃。

4）转向直拉杆（管）。原坯料用 35 钢管 ϕ44 mm × 6 mm，长 600 mm。工作循环见图 5.6-56，为了减少锻件的弯曲度，必须在副夹头上夹一根导向芯棒（见图 5.6-57），为避免夹钳夹持的钢管端（ϕ44 mm）被压扁，可采用圆形夹钳，使挡块头深入钢管端。如采用 V 形夹钳，易把钢管压扁而使锻件报废。

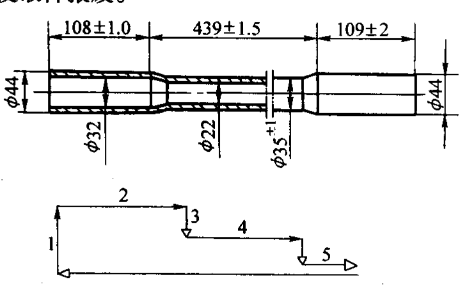


图 5.6-56　转向直拉杆锻件图和工作循环图

5）中间轴。中间轴的锻件形状特点是中间台阶直径大，两端的台阶直径较小（参见图 5.6-58）。中间轴的原坯料尺寸为 ϕ70 mm × 280 mm。某厂径向锻造生产时采用人工调头半自动循环，即在锻完一边台阶后，锻件由人工调头再继续工作循环锻完另一端台阶。工作循环见图 5.6-58。

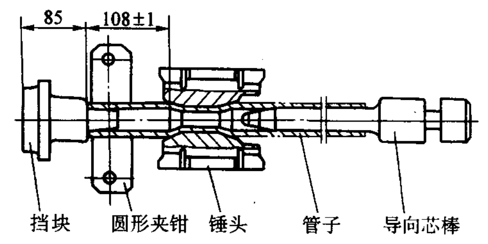


图 5.6-57　转向直拉杆的始锻位置

采用定位挡块（参见图 5.6-59），避免和减小了锻件因调头产生的同轴度误差。采用专用圆形夹钳（参见图 5.6-



59)，减小了锻件上夹钳夹压痕的深度。

（2）特殊锻件

1）白口铸铁的径向锻造。白口铸铁制轧辊锻件如图5.6-60所示，坯料选用 ϕ125 mm 铸锭。加热温度 900 ~ 940℃，

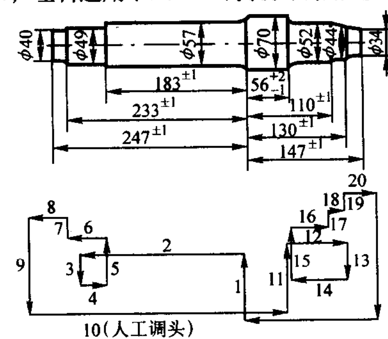


图 5.6-58 中间轴锻件图和工作循环图

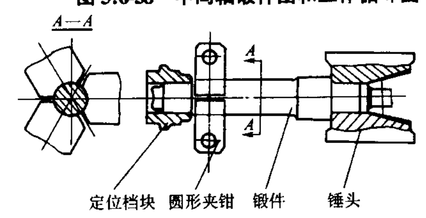


图 5.6-59 圆形夹钳和定位挡块

终锻温度 800℃。共锻八火，23 道次：第一火全部锻至 ϕ110 mm；第二火全部锻至 ϕ92 mm；第三火，四火分别锻至 ϕ74 mm；第五火，六火分别锻至 ϕ52 mm；第七火，八火分别锻至 ϕ41 mm。锻造过程中可在 ϕ92 mm 与 ϕ52 mm 过渡处不留过渡段，锻成 R5 mm 的连接圆角，效果较好。但要注意每次锻造都从同一个部位压下时，容易锻裂。最好是每火三道次都留下塔形过渡段，下一火第一道次再从原位置进锤，将前一火的过渡段压下，同时还要再留过渡段，待下一火再锻掉。这是因为虽然进锤处压下量大一些，但参与变形的金属少。变形不太强烈，不易锤裂。锻造轧辊时实际选用的轴向送进速度为1 450 mm/min，径向送进速度为 220 mm/min。白口铸锭经精锻开坯后，可在空气锤平砧上锻粗和拔长。亦易于进行切削加工。因为锻件的硬度大约为 45HRC，延伸率和断面收缩率从 0 提高至 2% ~ 8%。

无缺口冲击韧度达 10 ~ 40 J/cm^2，抗拉强度达 600 ~ 800 MPa，抗弯强度达 1 600 ~ 2 100 MPa。

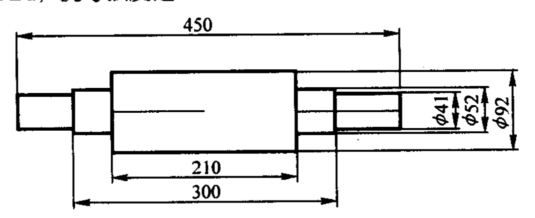


图 5.6-60 白口铸铁制轧辊锻件

2）粉末烧结体的径向锻造。等静压成形的金属合金棒含 W—90%，Ni—7%，Fe—3%。坯料尺寸为 ϕ40 mm × 350 mm，锻件直径 ϕ34 mm。等静压成形压力为 200 MPa，在真空下 1 300 ℃温度烧结，理论密度比为 0.97，抗拉强度 σ_b = 900 MPa，延伸率 δ = 15%。因为要调头，两火锻造有接头，要防止在接头处产生折叠。第一火锻造时，在进锤处锻出一个锥形过渡段，锥度大体为 1:10。具体操作是在进锤的同时夹头上升，协调径向与轴向送进速度得到。第二火调头锻时从已经锤到 ϕ34 mm 处空进锤，然后只用夹头上升拉打，采用的轴向送进速度为 1 000 mm/min，径向送进速度 ≤ 150 mm/min 锻造温度范围为 950 ~ 700℃。注意始锻温度不能过高，终锻温度可适当降低一些。尽量做到变形均匀；变形量适当，不宜过大。轴向送进速度以 1 000 mm/min 为宜。

6.5 径向锻造锻件常见工艺缺陷及其预防措施

径向锻造工艺变形，往往容易使锻件产生一些缺陷。现将其主要工艺缺陷及其预防措施列于表 5.6-8。

表 5.6-8 径向锻造锻件主要工艺缺陷及其预防措施

序号	工艺缺陷	产生主要原因	预防措施
1	端部凹坑	1）一次压下量偏小 2）锻造温度偏低 3）高合金钢变形抗力大，锻不透	1）增大一次压下量，变形程度大于 50% 2）保持适当锻造温度 3）使用较大设备，增大一次压下量
2	外圆呈棱角	被锻锻件直径与锤头圆弧整形段直径差过大	1）设计双圆弧整形段锤头，小直径端采用一次精压 2）降低轴向送进速度
3	螺旋形凹坑	锤头表面龟裂或粘有氧化皮	1）清理氧化皮 2）修理锤头工作表面
4	螺旋形脊椎纹	1）锤头圆弧 R 偏小 2）压下量大，轴向送进速度也偏大	1）增大锤头圆弧 R 2）分次进锤，减小一次压入量并给以一定锥度 3）降低轴向送进速度
5	各台阶不同心	毛坯旋转中心与锤头打击中心不重合	锤头和夹爪制造精度低，必须提高制造精度
6	锻件弯曲	1）锻后放置不当，冷却时造成弯曲 2）带凹档锻件直径差大且锻件长，锻下部台阶时易将上部扭出“硬弯”	1）锻后正确摆放 2）增加凹档处余量 3）减小一次压下量
7	管坯抱卡芯棒	1）芯棒太短 2）芯棒与管坯间黏附力太大	1）芯棒长度与锥度要合适，表面硬度要高 2）管坯内孔要进行粗加工，壁厚差在 2.5 mm 以下 3）管坯要加热均匀，径向温差小于 30℃，管内氧化皮厚度不宜超过 0.5 ~ 1.0 mm 4）采用双锥度平锤头，且两对锤头成形段的锥角互不相等，小 2°为佳 5）一次减缩率小于 5（否则要预锻） 6）合理使用润滑剂

编写：胡亚民（重庆工学院）

第 7 章　旋　　压

1　概述

1.1　分类和特点

旋压是用于成形薄壁空心回转体工件的一种金属压力加工方法。它借助旋轮等工具作进给运动，加压于旋转的金属板坯或空心回转体毛坯，使其产生连续的局部塑性变形而成为所需空心回转体工件。旋压主要包含普通旋压和变薄旋压两大类。在普通旋压和变薄旋压的应用中又形成特种旋压和局部成形。

（1）普通旋压

1）变形特征。普通旋压的变形特征是金属板坯在变形中主要产生直径上的收缩或扩张，直径收缩为缩径旋压，直径扩张为扩径旋压，由此带来的壁厚变化是从属的。由于直径上的变化容易引起失稳或局部减薄，故普通旋压过程一般分多道次进给逐步完成。

按旋轮进给方向，普通旋压有往程旋压与回程旋压之分，旋轮进给方向顺敞口端为往程旋压，反之，为回程旋压。

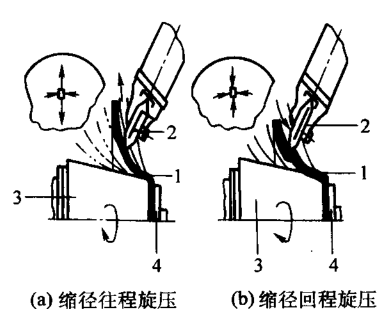
普通旋压成形缩径过程中，往程旋压径向受拉应力、切向受压应力；而回程旋压两向均受压应力，见图 5.7-1a、b 所示。

普通旋压扩径过程中往程旋压两向均受拉应力；而回程旋压切向受拉应力、径向受压应力，见图 5.7-1c、d 所示。

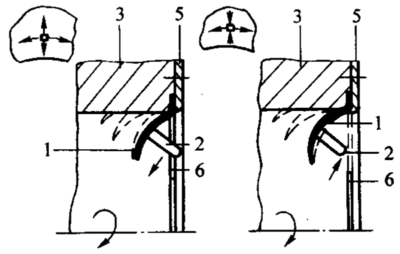
普通旋压成形区应力特征见表 5.7-1。

普通旋压成形形状较为复杂的零件时，要求操作者具有较高的技术水平。

2）工艺类别。按照变形温度的不同，普通旋压可分为室温旋压（冷旋）和加热旋压。



(a) 缩径往程旋压　　(b) 缩径回程旋压



(c) 扩径往程旋压　　(d) 扩径回程旋压

图 5.7-1　普通旋压不同进给方向

1—工件；2—旋轮；3—芯模；4—尾顶；5—压板；6—坯料

表 5.7-1　普通旋压成形区应力特征

旋压类别		成形区应力		主要成形限制
		径向	切向	
缩径旋压	往程旋压	拉应力	压应力	凸缘起皱，成形面局布过薄
	回程旋压	压应力	压应力	成形面近非敞口端起棱
扩径旋压	往程旋压	拉应力	拉应力	边缘过薄，径向开裂
	回程旋压	压应力	拉应力	

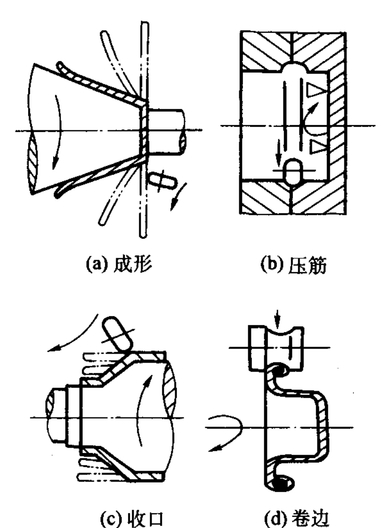
室温旋压适于延性好，加工硬化指数低的材料。常用材料有铝及其合金、金、银、铜等。

当材料室温延性低，硬化指数高，机床能力不足时，可采用加热旋压。加热旋压常用材料有铝－镁系防锈铝合金，钨、钼等难熔金属，以及钛合金等。

普通旋压可以完成成形、压筋、收口、封口、翻边、卷边等各种工序，见图 5.7-2。

根据机床的可能性和工件的成形需要，普通旋压的不同工序可在一次装卡中顺序完成。

按变形道次，变形范围的不同，普通旋压可分类如表 5.7-2。

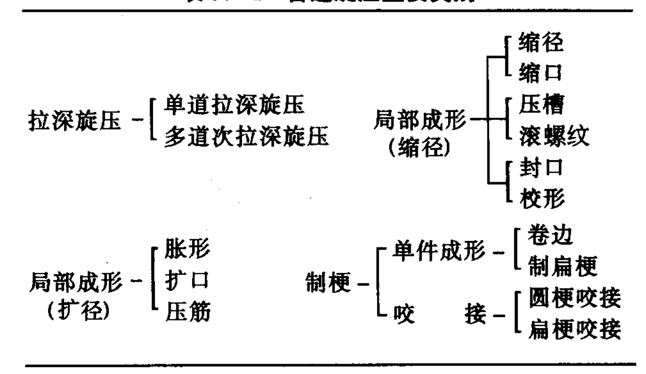


(a) 成形　　(b) 压筋

(c) 收口　　(d) 卷边

图 5.7-2　普通旋压成形工艺简图

表 5.7-2　普通旋压主要类别



拉深旋压 － 单道拉深旋压；多道次拉深旋压

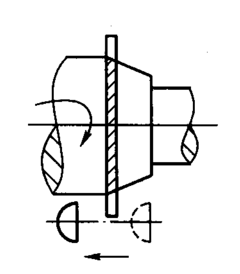
局部成形（缩径） － 缩径、缩口；压槽、滚螺纹；封口、校形

局部成形（扩径） － 胀形；扩口；压筋

制梗 － 单件成形 － 卷边、制扁梗；咬　接 － 圆梗咬接、扁梗咬接

3）三种基本成形工艺 普通旋压时，工艺选择应使工件不起皱，不破裂，尺寸精确，表面光洁，工效高，效益好。根据坯料和工件特点，普通旋压主要采用拉深旋压、缩径旋压、扩径旋压三种基本成形工艺。

① 拉深旋压。拉深旋压是普通旋压的基本形式，包括简单拉深旋压及多道次拉深旋压。简单拉深旋压是特定旋轮进行单道次，单向进给，见图5.7-3a。多道次拉深旋压为往程和回程相结合成形，见图5.7-3b。多道次旋压时旋轮运动轨迹和旋压道次应视工件形状而定。旋轮运动轨迹依靠模板装置或计算机编程控制来实现，采用渐开线形是较佳选择。


(a) 简单拉深成形

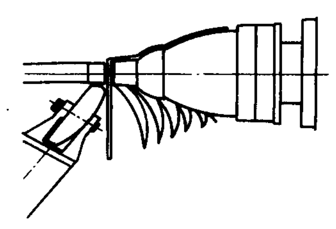

(b) 多道次拉深成形

图5.7-3 拉深旋压成形图示

② 缩径旋压。缩径旋压有缩口和缩径两种局部成形过程，缩口旋压见图5.7-4，旋轮轨迹有a、b、c三种形式。缩口时采用往程旋压易使坯料减薄，采用回程旋压则相反，二者的结合可减少壁厚差。

采用复合缩口旋压时，旋轮往返均有压下弯曲变形，以提高工效并防止壁厚拉薄现象。当薄壁筒坯变形抗力低，易变形失稳时，旋轮轴向每道次进给量不宜过大，宜采用小变形量多道次的成形工艺过程。

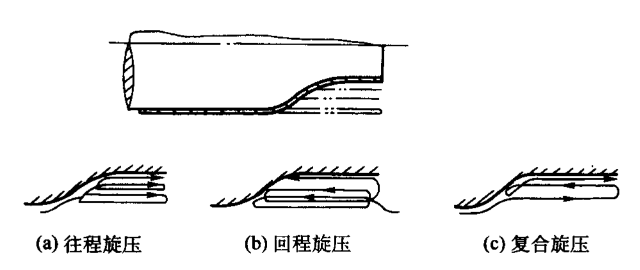

(a) 往程旋压 (b) 回程旋压 (c) 复合旋压

图5.7-4 缩旋过程示意图

缩径成形时工件在减径的同时沿轴向延伸，壁厚的变化取决于旋轮的几何形状、缩径深度、坯料材质、变形力及进给量与进给方向等因素。对于铝、铜工件的缩旋成形，由于其变形抗力较小，应该选择圆角半径较大的旋轮。相反，对于变形抗力较大钢件的缩旋成形，应该选择圆角半径较小的旋轮，以增加其单位面积的压力。

③ 扩径旋压。扩径旋压是在旋压过程中旋轮施力使预成形的坯料产生径向的扩张。扩旋成形的对象多数为薄壁工件，如鼓形搅拌器、车轮等。

扩旋时，材料胀形的伸长量 $\Delta L = (D_k - d_k)\pi$，单位长度的伸长率 $\delta = \Delta L / L_0 \times 100\%$。

式中，d_k 为扩旋前直径，mm；D_k 为扩旋后直径，mm；L_0 为坯料长度，mm。

筒形段扩径旋压，成形前后壁厚和直径的关系可参考等式，$t_f / t_0 = d_k / D_k$，即工件与坯料的壁厚之比等于其直径之比。不同工件扩径旋压工艺示意图见图5.7-5所示，图a为端部多道扩旋翻边，图b为端部压边成形；图c为内型扩径旋压。

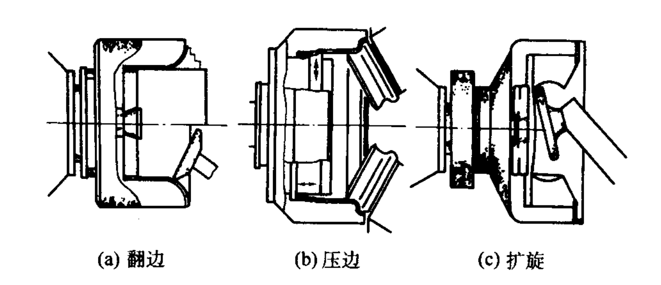

(a) 翻边 (b) 压边 (c) 扩旋

图5.7-5 扩旋示意图

4）普通旋压特点

① 模具制造周期较短，费用低于成套冲压模50%～80%。

② 普通旋压为点变形，旋压力可比冲压力低80%～90%。

③ 可在一次装卡中完成成形、切边、制梗咬接等工序。

④ 热旋成形时，旋压工件的加热，比其他加工方法方便。

（2）变薄旋压

1）成形特征。变薄旋压又称强力旋压，是在普通旋压的基础上发展起来的，其成形过程为：坯料随芯模旋转，旋轮作进给运动，使坯料连续地逐点变薄，并贴靠芯模而成为所需要的工件。旋轮的运动轨迹由靠模或计算机程序控制。

变薄旋压有流动旋压和剪切旋压两大类。流动旋压成形筒形件，剪切旋压成形异形件，参见图5.7-6，图a为锥（异）形件剪切旋压，图b、c为筒形件流动旋压。

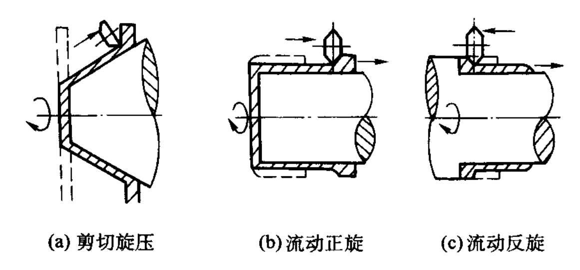

(a) 剪切旋压 (b) 流动正旋 (c) 流动反旋

图5.7-6 剪切旋压和流动旋压

变薄旋压工件因外形不同，可分为锥形件、筒形件及复合件，复合旋压件由锥形段和筒形段组成。锥形件强力旋压采用板坯或预制空心毛坯。筒形件强力旋压采用短而厚、内径与工件基本一致的筒形毛坯。

变薄旋压特点如下。

① 材料利用率高。与机加工相比，材料利用率可提高约10倍，加工工时降低近40%。

② 产品质量高。旋压后工件组织致密、纤维连续、晶粒细化、产品综合性能高。

③ 由于工件处于旋轮的高压下，使金属具有更高、更好的工艺塑性，成形性好。

④ 对设备吨位要求较小，适用于中大批量的生产。

⑤ 模具费用低、磨损小、寿命长。与拉深成形同类制件相比，旋压的模具费仅是拉深模具费的1/10左右。

变薄旋压过程遵循体积不变原理，筒形件变薄旋压时，变形前后的体积相等，公式表示为：

$$(D_m + t_0)\ t_0 l_0 = (D_m + t_f)\ t_f l_f \quad (5.7\text{-}1)$$ [1]

式中，D_m 为芯模直径，mm；t_0、t_f 为变形前后的壁厚，mm；l_0、l_f 为变形前后的长度，mm。

为计算简化，式（5.7-1）可简写为 $t_0 l_0 = t_f l_f$。

锥形变薄旋压即剪切旋压，见图5.7-6a所示，变形遵循正弦规律。

在平板旋压时：

$$t_f = t_0 \sin\alpha \quad (5.7\text{-}2)$$

在预制坯旋压时：

$$t_1/\sin\alpha_1 = t_2/\sin\alpha_2 \quad (5.7\text{-}3)$$

式中，t_0 为坯料壁厚，同变形前的壁厚；t_f 为成品壁厚或变形后的壁厚；α 为芯模半锥角；t_1 为预制坯壁厚；α_1 为预制坯半锥角；t_2 为工件壁厚；α_2 为工件预制坯半锥角。

2）工艺分类。变薄旋压可从变形性质、工件形状、旋轮与坯料相对运动方向与位置、旋轮形状与数量、以及温度等分类，主要类别见表5.7-3。

表5.7-3 变薄旋压的主要类别

变薄旋压	按变形性质和工件形状分	锥形剪切旋压和筒形流动旋压
	按旋轮与坯料流动方向分	正向旋压（正旋）与反向旋压（反旋）
	按旋轮和坯料相对位置分	内旋压与外旋压
	按旋压工具分	旋轮旋压与滚珠旋压
	按加热与否分	冷旋压与热旋压

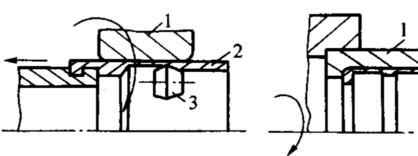
变薄旋压，按旋轮进给方向与坯料流动方向的异同，可分为正旋与反旋。正旋指坯料的延伸方向与旋轮进给方向相同，反旋指坯料的延伸方向与旋轮进给方向相反，如图5.7-6b、c。

按旋压时加热与否，可分为冷旋和热旋，常见合金的热旋温度见表5.7-4。

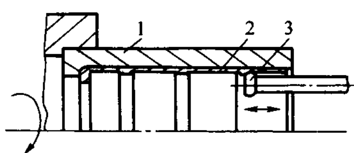
按旋轮与芯模与毛坯的相对位置，可分为外旋和内旋。内旋是管坯外有模环，旋轮置于管坯之内，相当于将外旋时旋轮与坯料的位置相互调换。图5.7-7a为局部外模内旋压，图5.7-7b为整体外模内旋压。

表5.7-4 常见合金的热旋温度示例

坯料材质	旋压温度/℃	工件类型	坯料来源
1A90/（LG1）	250～300	筒形件	离心铸坯
5A06/（LF6）	300～400	筒形件 锥形件	挤压管材
6A02/（LD2）	350～400	封口与收嘴	旋压管材
5A02/（LF2）	300～380	筒形件	离心铸坯
工业纯钛	425～535	筒形件	卷焊筒坯
TC－4	535～870	筒形件	挤压管材
钨及合金	600～1 316	筒形件	粉末烧结
铌及合金	200～750	异形件	板材
锆	850	封头	板材
不锈钢	600～750	锥形件	板材



(a) 局部模内旋压



(b) 整体模内旋压

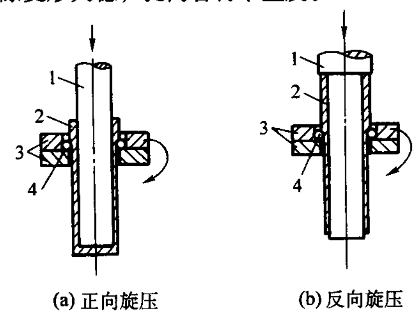
图5.7-7 内旋示意图

1—靠模；2—工件；3—旋轮

按旋压工具不同又可分为旋轮旋压和滚珠旋压。图5.7-8a为正向滚珠旋压，图5.7-8b为反向滚珠旋压。

按旋轮数量不同，可分单轮旋压和多轮旋压。

管材旋压时可进行张力旋压，即工件轴向的自由端施一张应力，张应力小于变形材料屈服强度。该工艺适宜长管旋压，可消除变形失稳，提高管材平直度。



(a) 正向旋压　(b) 反向旋压

图5.7-8 滚珠旋压示意图

1—芯轴；2—工件；3—凹模；4—圆环

3）变形过程。变薄旋压的变形过程可分为起旋、稳定旋压和终旋三个阶段。

起旋阶段是从旋轮接触毛坯旋至达到所要求的壁厚变薄率，该阶段壁厚变薄率逐渐增大，旋压力相应递增，直至达到极大值。

旋轮旋压毛坯达到所要求的壁厚变薄率后，旋压变形进入稳定阶段，该阶段的旋压力和变形区的应力状态基本保持不变。

终旋阶段是从距毛坯末端约五倍毛坯厚度处开始至旋压终了，该阶段毛坯刚性显著下降，旋压件内径扩大，旋压力逐渐下降。

筒形件三个阶段的旋压状态见图5.7-9a，旋压力变化曲线见图5.7-9b所示。

锥形件起旋阶段工艺参数选择不当会产生局部弯曲，坯缘褶皱等缺陷。终旋阶段旋轮过度靠近坯料边缘时，凸缘产生弯曲和倾斜，外层材料局部受拉应力易开裂。

4）变形区域。筒形件变薄旋压分三个区域，即未成形区、成形区和已成形区，成形区即为变形区，三个区域见图5.7-10所示。

锥形件剪切旋压采用板坯旋压时变形区域与筒形件变薄旋压略有不同，未成形区是法兰凸缘；采用预制坯旋压时，未成形区与筒形件变薄旋压相近。锥形件剪切旋压多为正向旋压。

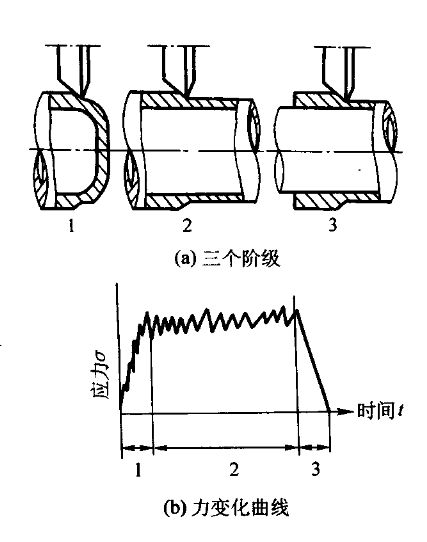


图 5.7-9 旋压三个阶段与旋压力变化曲线
1—起旋；2—稳定旋压；3—终旋

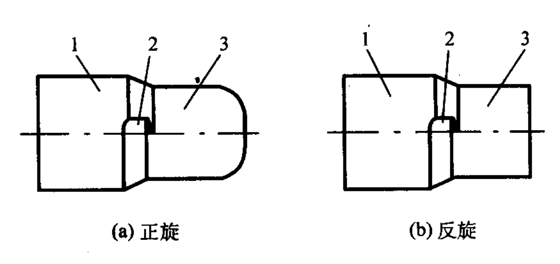


图 5.7-10 筒形件旋压三个区域
1—未成形区；2—成形区；3—已成形区

（3）特种旋压

1）车轮旋压。采用旋压工艺，可加工等强度无内胎车轮，并适应批量生产。无内胎车轮是由轮辐和轮毂（轮辋）组成。等强度轮辐结构由曲母线锥形段和圆柱段组成，属壁厚渐变工件，见图 5.7-11a。轮辐旋压含普通旋压与强力旋压复合成形工序，其旋压圆柱段见图 5.7-11b。

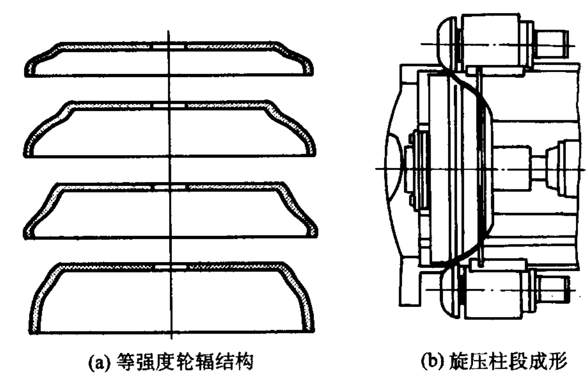


图 5.7-11 轮辐成形

轮辋构成车轮的主体，可采用旋压－滚压复合工艺成形，既可实现等强度要求，又适应批量生产。

2）带轮旋压。旋压带轮品种多样，基本有三种，即折叠式、劈开式、滚挤式。

折叠式带轮成形属普通旋压成形，劈开式带轮成形属普旋特殊形式。滚挤式带轮成形时材料产生局部径向位移。

旋压多齿式新型带轮，其结构紧凑，传动效率高，在汽车发动机等传动中被大量采用。多齿式组合带轮如图 5.7-12 所示。组合式带轮需要分工序旋压，包括采用轧旋与普旋等工序。

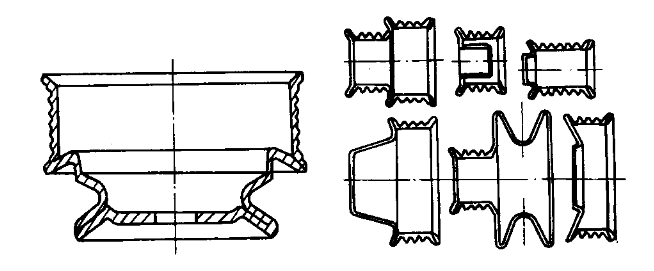


图 5.7-12 常见多齿式组合带轮

3）用环形轮旋压。环形轮旋压包括单旋轮和双旋轮，并有环形旋轮与芯模轴线平行或相交不同类别，见图 5.7-13。环形轮旋压可用于中小直径，薄壁筒形件变薄旋压。其优点是提高功效，减少扩径，在轴线相交时产生附加轴向张力，工件尺寸精度好。

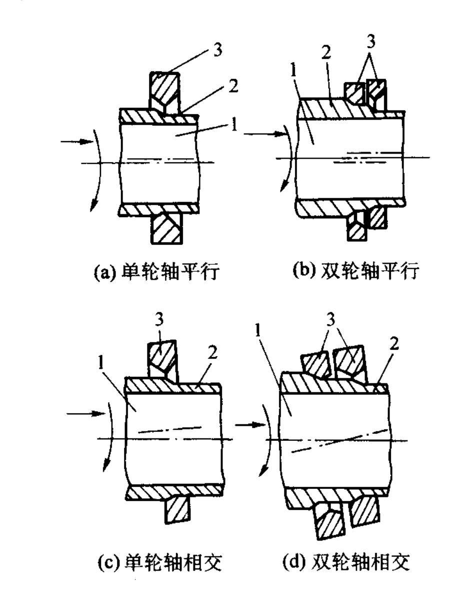


图 5.7-13 用环形轮旋压
1—芯模；2—坯料；3—旋轮

（4）局部成形

1）瓶体缩口。瓶体缩口与封合属局部成形工艺，可采用特殊型面的旋轮或卡板旋压。在高转速下经多道次进给，借空气模（无芯模）成形。旋轮或卡板运动时保持平直段与工件处于完全接触之中，卡板、压块、凸轮、压盘等摩擦工具缩口见图 5.7-14。

加热温度是局部成形的工艺要素之一，坯料加热可以采用机外加热，机上保温。

采用摩擦工具可比旋轮扩大增厚效应，减少工具费用，但也减少工具有效寿命。

瓶体封合时，筒坯壁厚偏薄易出现变形失稳的起皱现象，随着瓶口逐渐成形，褶皱被卷入中心，影响封合效果。增加筒坯壁厚，适量提高旋压温度及调整纵向进给量，可消除失稳、起皱、卷曲现象。

采用铝合金筒坯成形椭球瓶端时，瓶端缩旋壁厚可由 4 mm增厚至 15 mm，可强化瓶体。缩旋收口的道次与筒坯壁厚大致成反比；即坯壁越薄收口道次越多，4 mm 壁厚筒坯缩口需 20 余道次，10 mm 壁厚筒坯缩口需 10 余道次。



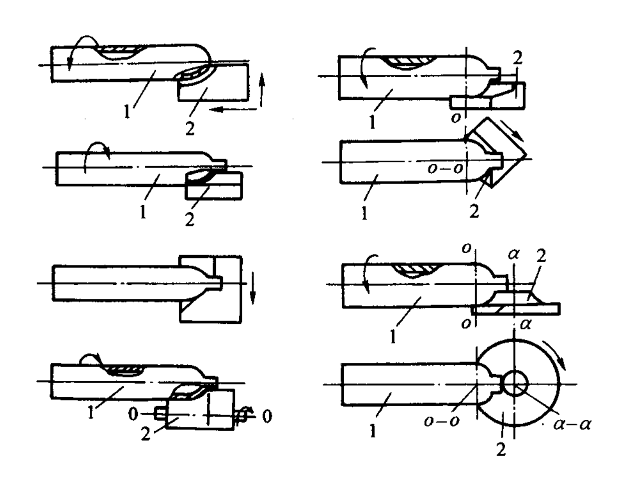


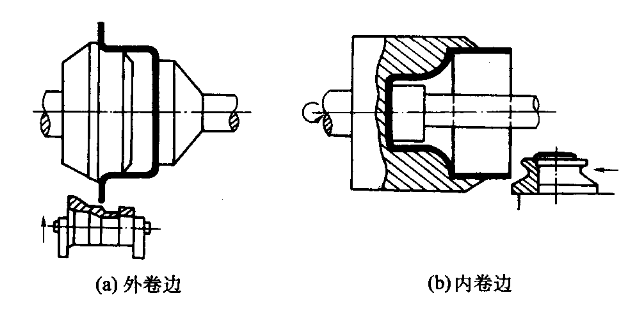
图 5.7-14 各种摩擦工具缩口与封口
1—瓶体；2—工具

2）卷边和咬接。卷边按坯料厚度选择圆梗直径。圆梗直径的取值见表 5.7-5。

表 5.7-5 圆梗直径的取值 mm

坯料壁厚	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
圆梗直径	1.5～2.5	2.5～3.5	4～8	5～14	8～18	14～22	18～24	20～30

当工件端口外卷时宜先预弯，再卷边。工件内卷边时则可直接进行。见图 5.7-15。



(a) 外卷边　　(b) 内卷边

图 5.7-15 外卷边与内卷边

扁梗咬接一般先进行预弯，三种典型扁梗咬接过程见图 5.7-16。

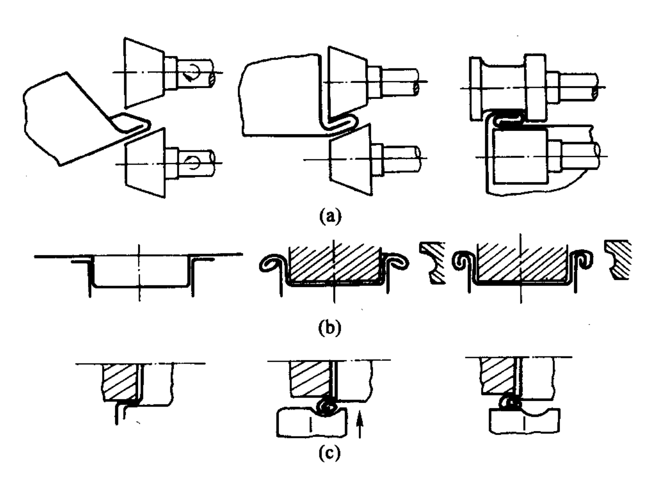


图 5.7-16 三种咬接形式

1.2 用途

（1）普通旋压

普通旋压工艺起源于手工擀棒技术，可将强度较高的材料，加工成复杂工件，其产品质量尚好。主要旋压产品有工艺品、乐器、炊具及薄壁容器等。

与手工擀棒相比，旋轮与坯料变形区的摩擦显著减少，质量提高，应用更为广泛。

选择成形槽辊，将坯料偏心安装，利用滚压法可旋制螺纹。

在工件端口外卷边和内卷边的基础上，可进行咬接制梗。

还可借旋轮进行旋压件的切割。

普通旋压应用广阔，其制品包括铝制品、搪瓷制品、保温瓶、照明器材、广播器材、高压电容器、化工容器、真空零件、文体用品等。

（2）变薄旋压

变薄旋压加工可以成形多种，传统工艺难以制作的工件。

变薄旋压可制作大直径无缝整体筒形件，消除轴向焊缝的不良影响。变薄旋压可成形导弹、火箭、宇航飞行器的发动机壳体。

航空发动机应用旋压成形的零件有：涡轮轴、压气机轴、进气道头锥、喷气尾锥、燃烧室衬套、轴承支座、压气机机匣等。

在兵器工业，旋压工艺可制造炮管、枪榴弹、破甲弹、风帽、弹头、药筒及药形罩等。

民用工业应用大量强力旋压制品，常见有气瓶、汽车的轮辐、轮毂、气缸、灭火器、封头、风机罩、奶罐、漏斗等。

（3）国外

国外旋压技术的广泛应用早于国内，德国在机床标准化，产品系列化的基础上，旋压技术被用于汽车部件、压力容器及各种民品的成形。

美国和前苏联将旋压技术用于军事和航天事业，强化了军事装备。

日本和意大利应用旋压技术成形大型封头，与冲压相比，既简化工艺又节省模具，发挥了旋压技术的优势。

西班牙很早就将旋压技术用于金属成形，其设备和工艺均很完善。

（4）国内

国内旋压技术广泛应用始于20世纪60年代中期，先后有几十个单位先后开展旋压技术的研究与开发。

北京航空工艺研究所研制数十台旋压机，其旋压设备形成标准化与系列化。该所试制了近百种以航空零件为主的旋压产品，其中异形件和高压气瓶的旋压成形已批量生产。

北京有色金属研究总院研制成功四台不同规格的旋压机。通过大量旋压产品的研制和生产，形成了一条生产不同规格、不同金属材料的旋压生产线。

随后，兵器、航天、冶金、原子能等行业陆续开展旋压技术的开发与应用。

航天部703所对航天工业用高温合金异型件的旋压成形作了大量研发，并形成成批生产铝合金筒体的能力。

北京航空航天大学现代技术研究所对旋压成形带轮研究深入，并积极推广应用旋压技术，将带轮旋压设备、工艺及产品标准化、系列化。

长期以来，旋压加工作为传统金属加工工艺的一种补充，被有效地用于轻工、纺织、采矿、冶金、石化、核能、电子、铁道、汽车、舰船、兵器、航空、航天等部门。



2 成形原理（变薄旋压）

2.1 主体运动

变薄旋压的主体运动是坯料随芯模进行的旋转运动。工件的成形，是依靠旋轮逐点连续挤压旋转的坯料来完成的。坯料在旋转时受到旋轮的阻碍而产生变形，同时借助于摩擦力使旋轮旋转。因此，旋轮的旋转运动是被动的，其转速大小决定于工件的转速和工件与旋轮的直径比。在坯料随旋压模具转动中，旋压工具与坯料相对进给，使坯料受压并产生连续的局部变形。

（1）锥形件

在锥形件剪切旋压时，随着旋压的进行，变形的直径不断增大，而旋轮的直径是不变的，因而旋轮的转速随之不断地同步变大。由于旋轮与工件接触面上各点的半径比是不同的，因此旋轮与工件间不仅有滚动摩擦，而且有滑动摩擦。

锥形件剪切旋压过程见图 5.7-17，图 a 为平板旋压，图 b 为预制坯旋压。

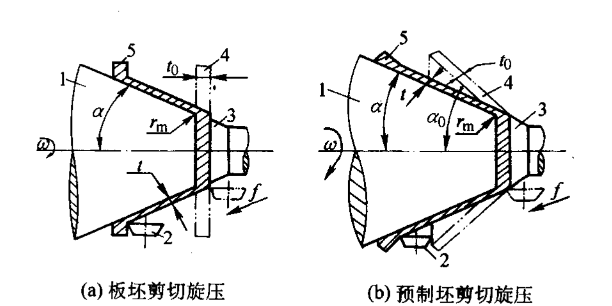


图 5.7-17 锥形件剪切旋压过程

1—芯模；2—旋轮；3—尾顶；4—坯料；5—旋压件

（2）筒形件

筒形件流动旋压与锥形件剪切旋压主体运动相似，均通过旋轮对工件局部施压，经工件与旋轮相对转动，并沿螺旋线逐步推进，完成整个工件的成形过程。变薄旋压时，坯料上有一个连续沿螺旋线位移的塑性变形区，其螺距等于坯料旋转一圈时旋轮的位移量。

筒形件流动旋压过程见图 5.7-18，图 a 为正向旋压，图 b 为反向旋压。

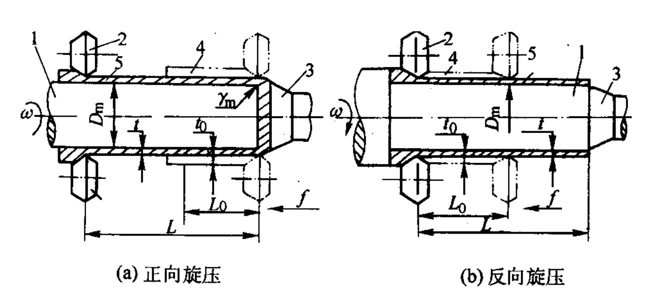


图 5.7-18 筒形件流动旋压过程

1—芯模；2—旋轮；3—尾顶；4—坯料；5—旋压件

2.2 变形规律

（1）剪切旋压变形规律

① 正弦规律。当芯模半锥角为 α，旋压件壁厚为 t_f 时，旋压前后壁厚关系满足正弦规律公式（5.7-2）。

正弦规律公式是制定工艺参数和控制剪切变形的依据。锥形件剪切旋压是复杂的金属变形过程，可简化变形过程为理想变形状态，将坯料视为若干同心单元环组成。剪切旋压后，同心单元环产生轴向滑动，形成锥体同心环；即纯剪切变形状态。按照纯剪切变形原理，由板坯旋压锥形件时，其壁厚减薄率 Ψ_t 与旋压件锥角之间存在下列关系：

$$\Psi_t = (t_0 - t_f)/t_0 = 1 - \sin\alpha \qquad (5.7\text{-}4)$$

纯剪切应变等于单元体轴向滑动的距离除以单元体的厚度，即 $\gamma = \mathrm{d}l/\mathrm{d}R = \cot\alpha$；

凸缘垂直轴线时，即 $\alpha = \theta/2 = 90°$；如坯料为预成形件，预成形锥角 $\theta/2$ 处于 90°～0°之间，则剪切应变为：$\gamma = \cot\alpha - \cot\theta/2$；即在芯模锥角相同时，预成形锥角越小则剪切应变越小。剪切旋压变形理想模型见图 5.7-19a。纯剪切旋压时坯料没有周向收缩，只产生轴向的塑性流动，坯料变形前后任何点的半径距离均相等。

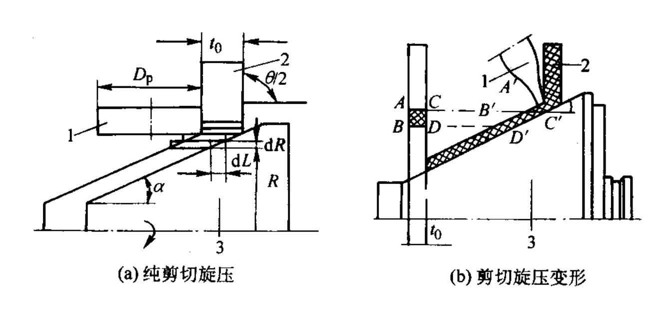


图 5.7-19 剪切旋压变形示意图

1—旋轮；2—凸缘；3—芯模

锥形件剪切旋压旋轮与坯料接触实际变形见图 5.7-19b 所示。坯料相邻线段 AB、CD，即 $AC = BD = t_0$；变形后 $A'C' = B'D' = t_0$。变形表现为由 $ACBD$ 矩形变成 $A'C'B'D'$ 平行四边形，即 AC 相对 BD 平行错动，只有角度变化。

锥体在旋轮作用下除剪切变形外，还有沿周向的塑性流动，因坯料与芯模的摩擦作用，导致工件外表面应变硬化强于内表面。

锥形件由多道次剪切旋压成形时，半锥角为 α_n，半成品的壁厚为 t_n，板坯壁厚 t_0 的正弦关系为 $\sin\alpha_n = t_n/t_0$。

② 变形与摩擦。锥形件旋压时旋轮与工件的接触见图 5.7-20 所示。由图可知，旋轮的 AB 段与工件接触。由 A 到 B 点，工件与旋轮半径比逐渐增大，各点摩擦所产生的旋轮转速也逐渐增大。在 AB 段只有一个同速点，即工件的圆周速度与旋轮的圆周速度相等，此点为滚动摩擦，其余点为滑动摩擦。AB 段中 E 点为同速点，即

$$n_M r_E = n_R R_E \qquad (5.7\text{-}5)$$

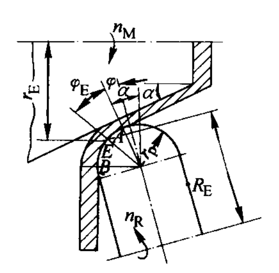


图 5.7-20 锥形旋压变形

式中，n_M 为工件转速；n_R 为旋轮转速；r_E 为同速点处工件半径；R_E 为同速点处旋转半径。

据计算和实测可知，同速点 E 的位置角 φ_E 随旋轮所处位置的不同而变化。在 AE 段，工件的速度低于旋轮，工件对旋轮的摩擦力使旋轮减速；在 EB 段，工件的速度高于旋轮，工件对旋轮的摩擦力使旋轮加速。只有在 E 点的位置使两个相反的摩擦力矩平衡，旋轮的转动才能稳定。

③ 三向投影面积。锥形件剪切旋压变形过程中，旋轮圆角挤压坯料使其产生塑性变形时，旋轮与坯料的接触面为一空间曲面，该曲面沿三个方向分别投影，变为三个平面图形。锥形件剪切旋压旋轮与工件三面投影见图 5.7-21 所示，A_L 为轴向，A_θ 为周向，A_R 为径向。

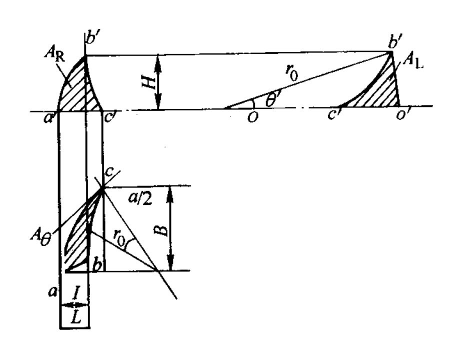


图 5.7-21 锥形件旋压接触三面投影

锥形件旋压时，旋轮与工件接触面简化后的投影分别为 abc、$a'b'c'$ 和 $a''b''c''$。有关尺寸按下列各式计算，径向、轴向、周向三个边长计算公式如下：

$$H = f\cos\alpha \quad (5.7\text{-}6)$$

$$L = r_p\ (1-\sin\alpha) \quad (5.7\text{-}7)$$

$$B = r_p\cos\alpha \quad (5.7\text{-}8)$$

式中，f 为旋轮进给比，mm/r；r_p 为旋轮圆角半径，mm。

由作图法可导出三个投影图形的轮廓数值，根据解析法近似计算，可求出三向投影接触面积。三向投影面积简化计算公式如下。其中周向接触面积为 A_θ，径向接触面积为 A_R，轴向接触面积为 A_L。

$$A_\theta = 1/2\times f\times r_p\times\cos^2\alpha \quad (5.7\text{-}9)$$

$$A_R = 1/2\times r_p\times\ (1-\sin\alpha)\ \times r_0\times\theta_0 \quad (5.7\text{-}10)$$

$$A_L = 1/2\times r_p\times\cos\alpha\times r_0\times\theta_0 \quad (5.7\text{-}11)$$

式中，r_0 为变形区的工件半径，mm；θ_0 为变形区在工件截面内的夹角，rad。

(2) 流动旋压变形规律

① 塑性流动规律。在筒形变薄旋压塑性变形区内，通过旋轮与坯料的相对转动，变形区出现流动塑性变形。变形瞬间，变形区以径向压缩导致轴向和周向产生金属流动。

筒形变薄旋压变形遵循金属流动最小阻力定律，从而产生体积位移，轴向流动是主要的流动方向，周向的流动很少。

筒形变薄旋压成形过程中，作为刚体的旋轮压入塑性工件，其接触面的三向投影接触面积是旋轮形体与工件形体的相贯线。

旋轮与工件的接触区如图 5.7-22 所示，可对旋轮与工件接触区的任一横断面 $N—N$ 上的摩擦力进行分析。

由图看出，横断面的旋轮与工件接触于 AB 弧。在 AB 弧上，旋轮上每一点的圆周速度是相等的，即

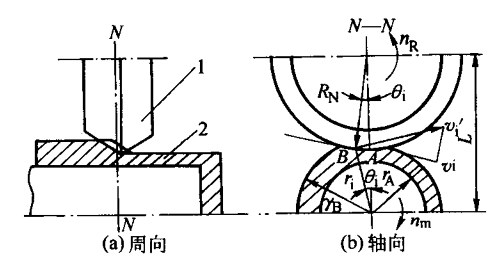


图 5.7-22 旋轮与工件接触区
1—旋轮；2—工件

$$v_N = 2\pi R_N n_R \quad (5.7\text{-}12)$$

式中，v_N 为 $N-N$ 截面上旋轮的圆周速度，mm/min；R_N 为 $N-N$ 截面上旋轮的半径，mm。

在工件上，AB 弧上各点的圆周速度 $v'_\theta = 2\pi r_i n_M$ 是不等的。式中，v'_θ 为在位置角为 θ'_i 处的圆周速度，mm/min；r_i 为在位置角为 θ'_i 处的工件半径，mm；n_M 工件的转速，r/min。

由上式可知，v'_θ 值随 r_i 值发生变化；同时，v'_θ 在旋轮切线上的投影 v_i 也随之变化。因此，$v_i = f\ (r_i)$；由图上的几何关系可知：

$$v_i = 2\pi r_i n_M\cos(\theta_i+\theta'_i) = 2\pi r_i n_M(\cos\theta_i\cos\theta'_i - \sin\theta_i\sin\theta'_i)$$

根据 $R_N\sin\theta_i = r_i\sin\theta'_i$ 及 $L = R_N\cos\theta_i + r_i\cos\theta'_i$（$L$—旋轮与工件的中心距），上式可简化为：

$$v_i = 2\pi n_M(L\cos\theta_i - R_N)$$

在一定的横断面上，n_M、L 和 R_N 值都是常数，故 $v_i = f(\cos\theta_i)$，v_i 值由 A 点到 B 点逐渐减小。在旋轮和工件的接触面上，只有满足 $v_i = v_N$ 的点才是两者的同速点，该点为滚动摩擦，其余点为不同程度的滑动摩擦。

由于旋轮和工件的接触面上出现大量的滑动摩擦，既需要较大的功率，又产生一定的热量，必须对旋轮和工件的接触面进行充分的润滑和冷却。

变薄旋压的周向壁厚变形示意图见图 5.7-23。图中，Z_0 为分流距，t'_0 为含堆积量的坯厚。

从图 5.7-23 剖面分流图可看出，在工件被旋轮碾压一圈的体积中，以距 y 轴为 z_0 的分流线为界，面积 B 的金属向后流向旋压件的壁部，面积 A 的金属向前流动形成隆起与堆积 3。箭头 c 表示有少量金属沿周向流动。金属隆起与堆积导致 t_0 增至 t'_0，增大变形量与变形力。当隆起量不变时，旋压变形基本稳定。

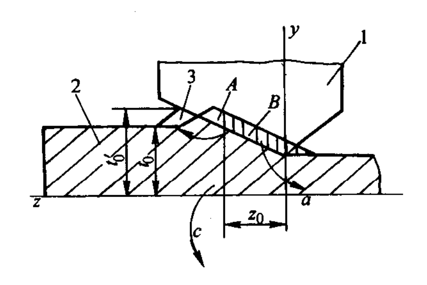


图 5.7-23 变薄旋压示意图
1—旋轮；2—坯料；3—堆积

② 变形与摩擦。在筒形件变薄旋压塑性变形过程中，无论正旋与反旋，旋轮与工件的接触面存在着强烈的滑动摩擦。变形区由已变形区向未变形区推进，稳定流动时，单位时间流入变形区的金属量等于流出变形区的金属量。



正旋时，变形区流速为 v_s，与已变形区流速 v_s 和未变形区流速 $v_s - v'_s$ 的方向相反；相对旋轮的流速 v_{x1} 与相对芯模的流速 v_{x2} 方向不同，见图 5.7-24a 所示。

反旋时，变形区流速 v_s，与未变形区流速 v_s 和已变形区流速 $v_s + v'_s$ 的方向相反，相对旋轮的流速 v'_{x1} 与相对芯模的流速 v'_{x2} 方向相同，见图 5.7-24b 所示。

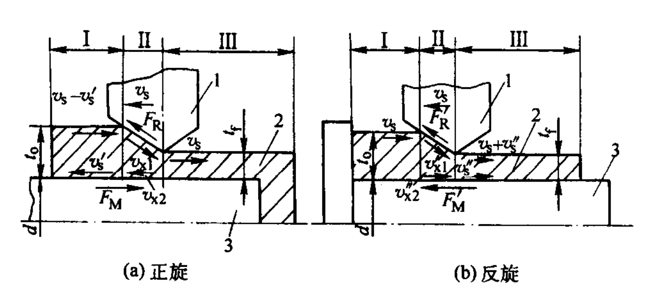


图 5.7-24 旋轮与工件接触区及摩擦
1—旋轮；2—工件；3—芯模；
Ⅰ—未变形；Ⅱ—变形区；Ⅲ—已变形区

在变形区，金属正旋与反旋塑性流动的摩擦阻力分别为 F_R 与 F'_R，就旋轮而言，均向着床头方向。就芯模而言，金属塑性流动的摩擦阻力 F_M 与 F'_M 在正旋与反旋不同过程中方向相反。

变薄旋压时，材料综合了压缩、拉伸和剪切的复合变形。受变形量和摩擦阻力的影响，金属畸变程度靠近旋轮处变形量较大，靠近芯模处变形量较小。

③ 塑性流动场。在筒形变薄旋压变形区的三个区域中，用扇形塑性流动场对材料的流动和变形表示见图 5.7-25 所示。

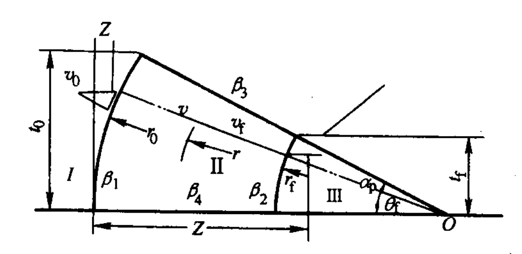


图 5.7-25 变形区的扇形塑性流动场

在扇形变形区内，金属质点沿扇形半径向扇形圆心 O 点方向流动，其流速逐渐增加，但同一圆弧上各质点的流速相等。在未成形区和已成形区中，质点分别以均匀的流速 v_0 和 v_f 沿轴向流动。在变形区中，在以 O 点为圆心，半径为 r 的圆弧上，各质点的流动速度是相等的。图中存在下列几种关系：

$$r_0/r_f = t_0/t_f = 1/1 - \Psi_t \qquad (5.7\text{-}13)$$

$$r_0 = t_0/\sin\alpha_\rho \qquad (5.7\text{-}14)$$

$$r_f = t_f/\sin\alpha_\rho \qquad (5.6\text{-}15)$$

式中，α_ρ 为旋轮工作角。

④ 三向投影面积。筒形变薄旋压时，三向投影接触面见图 5.7-26 所示。

工件与旋轮接触面简化后的三面投影分别为 $abcd$，$a'b'c'd'$ 和 $a''b''c''d''$。图示径向、轴向、周向的接触边长计算公式如下：

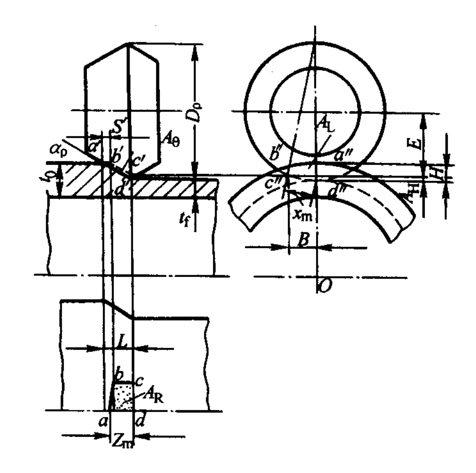


图 5.7-26 三向投影接触面

$$H = t_0 - t_f \qquad (5.7\text{-}16)$$

$$L = (t_0 - t_f)\cot\alpha_\rho \qquad (5.7\text{-}17)$$

$$B = [(D_\rho - f'\tan\alpha_\rho)f'\tan\alpha_\rho]^{1/2} \qquad (5.7\text{-}18)$$

式中，D_ρ 为旋轮直径，mm。

在变薄旋压中常用双锥面旋轮，设旋轮圆角半径 $r_\rho \approx 0$，三向投影接触面可看作直线形，周向接触面积 A_θ 作为平行四边形可用下式近似计算，即

$$A_\theta = (t_0 - t_f)f \qquad (5.7\text{-}19)$$

径向接触面积 A_R 作为梯形可用下式近似计算，即

$$A_R = (D_\rho f\cot\alpha_\rho)^{1/2}(t_0 - t_f) \qquad (5.7\text{-}20)$$

轴向接触面积 A_L 作为长方形可用下式近似计算，即

$$A_L = (t_0 - t_f)(D_\rho f\tan\alpha_\rho)^{1/2} \qquad (5.7\text{-}21)$$

3 坯料

3.1 可旋材料

用于旋压成形的金属与合金有百余种，有色金属及其合金约 40 种，应用最多的是铝、铜、钛及其合金；其次是钨、钼、锆、铌等稀有金属。

铝、铜及其合金属于塑性良好的有色金属旋压用材，其多数在室温条件下旋压变形，极限变薄率在 60% ~ 90% 之间，有利于旋压塑性变形。钛及其合金属于稀有金属，具有六方晶格，室温塑性较差，除纯钛可在室温进行较小的变薄率旋压变形外，多数钛合金需要热旋开坯，待晶粒细化，可冷旋变形。钨、钼、锆、铌金属为稀有高熔点金属，均需加热旋压。

在黑色金属旋压材料中，碳钢与合金钢、结构钢、超高强度钢等约有 50 余种，典型的超高强度钢有 D6AC 钢和 406 钢，结构钢有 40CrNiMo、14MnNi、40Mn2、30CrMnSi、15MnPV等钢种。

为了提高材料的旋压性能，变薄旋压要求材料具有良好的塑性，均匀的金相组织；材料硬度适当，小的屈强比。

3.2 普旋坯料

用于普通旋压成形的回转体有杯筒、圆锥、碟型工件等。坯料直径计算可参照拉深有关公式，按等面积原则进行。杯型和异型件回转体坯料直径计算公式见表 5.7-6、表 5.7-7 所示。

表 5.7-6　杯型回转体坯料直径计算　　mm

序号	简　图	毛坯直径 D_0
1		$D_0=\sqrt{d^2+4dh}$
2		$D_0=\sqrt{d_2^2+4d_1h}$
3		$D_0=\sqrt{d_2^2+4(d_1h_1+d_2h_2)}$
4		$D_0=\sqrt{d_3^2+4(d_1h_1+d_2h_2)}$
5		$D_0=\sqrt{d_1^2+4d_1h+2l(d_1+d_2)}$

表 5.7-7　异型回转体坯料直径计算　　mm

序号	简　图	毛坯直径 D_0
1		$D_0=\sqrt{d_1^2+d_2^2+4d_1h}$
2		$D_0=\sqrt{8R\left[x-b\left(\arcsin\frac{x}{R}\right)\right]+4dh_2+8rh_1}$

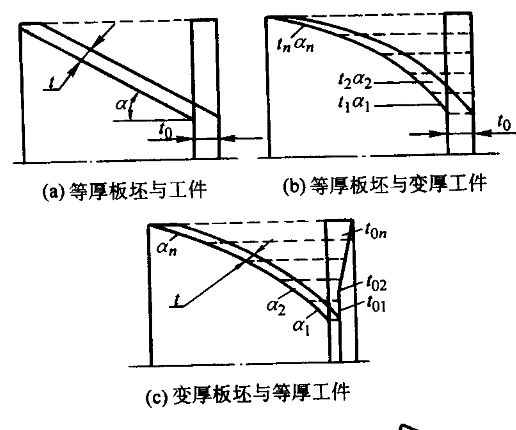
续表 5.7-7

序号	简　图	毛坯直径 D_0
3		$D_0=\sqrt{d_2^2-d_1^2+4d_1\left(h+\frac{l}{2}\right)}$
4		$D_0=\sqrt{d_1^2+4d_1h_1+4d_2h_2}$

3.3　剪切旋压坯料

锥形件剪切旋压有三种典型形式，一是等壁厚坯料旋压等壁厚工件；二是等壁厚板坯旋压变壁厚工件；三是变壁厚坯料旋压等壁厚工件。锥形件剪切旋压坯料与锥角的关系见图 5.7-27。

图 5.7-27a 与 d 按正弦规律公式，即式（5.7-2）、式（5.7-3）计算坯料与锥角；其余均将坯料与工件沿径向等分，一一对应计算。分段数量要充足，计算时以工件及坯料内径为准，算出各段平均锥角与壁厚，然后叠加。



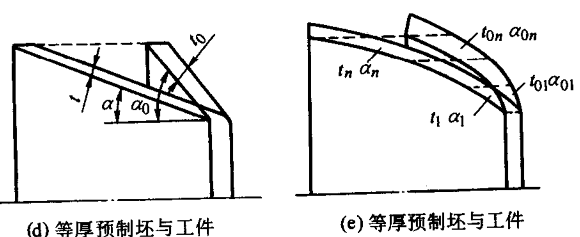


图 5.7-27　锥形变薄旋压坯料与工件

图 5.7-27b、c 与 e 可分段按下式计算

图（b）$t_1=t_0\sin\alpha_1$　$t_2=t_0\sin\alpha_2$　…，$t_n=t_0\sin\alpha_n$

图（c）$t=t_{01}\sin\alpha_1$　$t=t_{02}\sin\alpha_2$　…，$t=t_{0n}\sin\alpha_n$

图（e）$t_1/\sin\alpha_1=t_0/\sin\alpha_{01}$　$t_2/\sin\alpha_2=t_0/\sin\alpha_{02}$　$t_n/$

$\sin\alpha_n = t_n/\sin\alpha_{0n}$

3.4 流动旋压坯料

流动旋压坯料尺寸计算原则依据体积不变规律。变薄旋压时，坯料内径与工件内径大致相同，坯料与工件尺寸应符合式（5.7-1）。

筒形件旋压坯料要有较高的尺寸精度，坯料内径与芯模配合的间隙值应以变形金属塑流稳定为目的。如坯料与芯模直径的间隙小，则有利于对中。为了便于装模，中小件的直径间隙为 0.10～0.20 mm，大件则达 0.30～0.60 mm 之间。坯料筒壁壁厚差应≤0.10～0.20 mm，直线度误差应≤0.05～0.10 mm。粗糙度一般为 R_a = 3.2～6.4 μm 为宜。常见筒形旋压件坯料内径与芯模的直径间隙见表 5.7-10。

表 5.7-10 坯料内径与芯模的直径间隙 mm

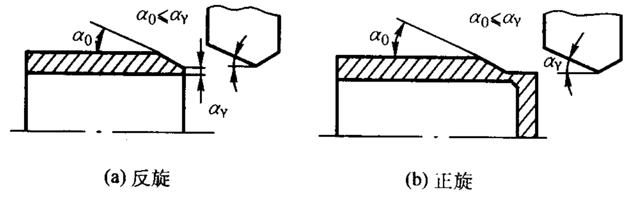
坯料内径	<100	100～200	200～400	400～700	700～1 200	>1 200
（间隙/坯料内径）/%<	0.25	0.2	0.15	0.1	0.08	0.06

对于壁厚变化的筒形件，坯料体积的计算应逐段求出工件的体积后，进行叠加。也可进行简化由纵向截面积叠加，求出坯料尺寸。筒形件变薄旋压的坯料为管坯，其壁厚大则长度短，机械加工方便；要以旋压力不过大，中间热处理道次不过多为宜。

管坯的质量要求包括管坯的内外表面应光滑，不得有裂纹、擦伤、起皮等缺陷存在。

管坯的显微组织不得有过烧。低倍组织不得有夹层、缩尾、气泡、气孔等。

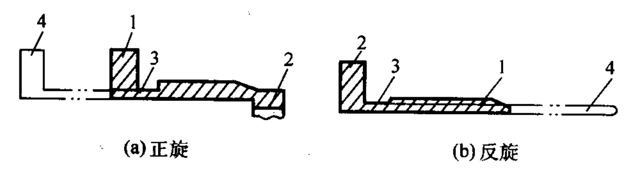
厚壁坯料起旋处形状应与旋轮工作部分形状相吻合。坯料带厚底时，起旋处宜越过底部，见图 5.7-29。在首道次旋压时，终旋点位置应距坯料尾端（1.5～6）t_0 以上，随后道次则宜距前一道次终点 1～3 mm 以上。



(a) 反旋　　(b) 正旋

图 5.7-29 起旋示意图

带厚法兰时，在法兰与旋压段之间要设卸荷段；运动段不小于 3～8 mm，非运动段不小于 2～3 mm。见图 5.7-30。



(a) 正旋　　(b) 反旋

图 5.7-30 终旋卸荷段

1—坯料运动端点；2—坯料非运动端点；3—卸荷槽；4—工件

4 工艺参数

4.1 剪切旋压

（1）减薄率与道次

锥形件剪切旋压减薄率的计算式为式（5.7-4），即 $\Psi_t = (t_0 - t_f)/t_0$；板坯旋压时 $\Psi_t = 1 - \sin\alpha$；预制坯旋压时 $\Psi_t = 1 - \sin\alpha/\sin\alpha_0$

不同材料一道次旋压的极限减薄率 Ψ_{tmax} 见表 5.7-8，由表可以看出，相同合金不同状态可旋性差别较大。

小锥角工件剪切旋压后期道次的变形规律接近筒形变薄旋压，应采用较小的减薄率。经多道次旋压可获得半锥角为 3°～4°的工件。

表 5.7-8 板坯一道次极限减薄率椭球试验所得

材料	6A10		2219		30CrMnSi		LC4	H62	5A02	5A21
壁厚/mm	5.5	5.5	5.5	5.5	8	8	5	6	8	6
状态	CZ①	M②	CZ	M	R③	M	M	M	M	M
Ψ_{tmax}/%	35	52	45	58	56	62	68	72	73	78
等级	差	中	差	中	中	良	良	良	良	优

① CZ——淬火时效；
② M——退火；
③ R——挤压状态。

（2）壁厚偏离率

锥形剪切旋压时，壁厚偏离率为工件实际壁厚 t_f 对理论壁厚 t_t 的偏差程度；即 $\Delta_t = (t_f - t_t)/t_f$。它包括 $\Delta_t = 0$（零偏离或正弦率旋压），$\Delta_t > 0$（正偏离）和 $\Delta_t < 0$（负偏离）三种情况。

$\Delta_t > 0$，实际壁厚大于理论值为正偏离，有附加拉深变形，工件精度及材料可旋性降低，法兰边易起皱。反之，$\Delta_t < 0$ 为负偏离；有附加轧压变形，变形区出现周向拉应力，径向压应力，见图 5.7-28，旋压力急增，材料可旋性改善，旋轮前易堆积。剪切旋压变形偏离正弦率时法兰边易倾斜。

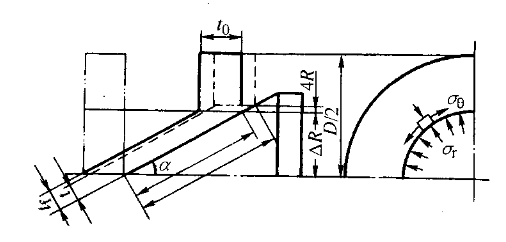


图 5.7-28 负偏离应力简图

完全遵循正弦规律剪切旋压变形较难达到，而小量偏离也是允许的。平板锥形剪切旋压偏离率 Δ = −10%～+5%。预制坯锥形剪切旋压时，薄料采用正偏离；厚料偏离率 Δ 可在 −30%～+30%之间。

（3）进给比

进给比又称进给率，是旋轮相对坯料的进给速度与转速之比，即单位转速旋轮的进给量，公式如下：

$$f = v/N \tag{5.7-22}$$

式中，v 为旋轮沿工件母线进给速度；N 为主轴转速（工件转速）。

f 大则工效高，应以旋压力、表面粗糙度值不过大为限。常以 f = 0.1～1.5 为选择参考。壁厚和旋轮圆角半径大时 f 取大值。

主轴转速 N 大则功效高，以不产生振动，旋压变形热量不过大为限。常用圆周速度 v_θ = 50～300 m/min。当坯料厚，硬度大，直径小时 v_θ 取小值。

采用恒线速和恒进给比可以改善工件表面粗糙度和尺寸精度。

（5）旋轮参数

旋轮顶端圆角半径 r_ρ 小则旋压力小，工件贴模度好，以不形成粘附，表面粗糙度值不过大为限，通常可在 r_ρ = (1～4) t_0 范围内选择。锥形变薄旋压时的旋轮圆角半径见



表5.7-9。

表5.7-9 锥形变薄旋压旋轮圆角半径

坯料壁厚	减薄率		
t_0/mm	30%	50%	70%
1~2	2~4	3~5	3~6
2~6	3~8	4~10	4~12
6~10	6~12	8~15	10~18
10~15	10~15	15~25	18~30
15~20	15~20	20~30	25~40
20~30	20~30	25~45	40~60

将2~3个形状、尺寸相同的旋轮配置在同一截面内工作，可以减少芯模的弯曲与振动。采用2个圆角半径不同的旋轮，使二者保持一定的错距量，以圆角半径小的旋轮为精旋轮，减少旋轮与坯件的接触面积，可降低旋压力，提高尺寸精度和改善综合质量。

4.2 流动旋压

(1) 正、反旋压

正旋压适用面较宽，旋压力较小，直径精度优于反旋压。反旋压的芯模及行程较短，其应用限于不带底的工件。

对于不带底的筒形件也可以采用正旋压，但需增加适当工装，详见图5.7-31。

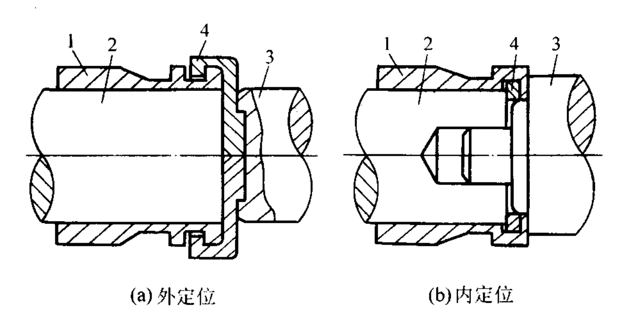


图5.7-31 不带底正旋压

1—坯料；2—芯模；3—尾顶；4—定位环

(2) 减薄率与道次

筒形变薄旋压减薄率反映工件的变形程度，计算公式与异形件旋压中式(5.7-4)相同，即 $\Psi_{tn}=(t_{n-1}-t_n)/t_{n-1}$，$\Psi_{tn}$为工件的道次减薄率，$\Psi_t=(t_0-t_f)/t_0$，$\Psi_t$ 为工件的总减薄率。

变薄旋压道次减薄率对工件内径的胀缩量及尺寸精度的影响较大，在总减薄率确定后，根据工艺条件和工件尺寸精度要求，分成若干道次进行变薄旋压。道次减薄率过大会造成工件塑性流动失稳堆积，表面易出现起皮。道次减薄率过小会引起工件厚度变形不均，工件内壁变形不充分而出现裂纹。通常道次减薄率20%~30%为最佳选择范围。旋压道次减薄率主要以工件壁厚为选择依据，为使壁厚变形均匀，壁厚偏厚取上限，壁厚偏薄取下限；还应考虑减薄量与旋轮压下台阶的关系，即减薄量小于压下台阶。

多道次旋压采用中间热处理的过程中，热处理后的旋压累计变形量决定工件的综合性能，旋压减薄率和旋压道次要根据工件性能要求确定。表5.7-11为一些实例。

同一种材料进行筒形变薄旋压的总减薄率略大于锥形剪切旋压的总减薄率，并远大于球形剪切旋压的总减薄率。不同材料一道次旋压的极限减薄率见表5.7-12。筒形变薄旋压的道次减薄率太小，坯料内表面材料不流动，并产生分层。一道次适宜减薄率可计算如下

$$\Psi_{topt}=\frac{2\sin\alpha}{1+2\sin\alpha}\left(1-\frac{f}{4t_0\cos\alpha}\right) \qquad (5.7\text{-}23)$$

式中，α 为旋轮工作角，(°)。

多道次旋压时的总减薄率大于一道次旋压的极限减薄率，一般可达75%，个别达90%。当总减薄率不超过极限值时，通常不加中间退火。

表5.7-11 不同合金筒形件旋压的减薄率与道次

合金	规格/mm	坯厚/mm	压下量/mm	变薄率/%	道次	温度/℃
5A06	ϕ534×20×2 000	80	8~12	15~30	6	300~380
1A90	ϕ903×16×800	76	10~17	20~35	5	320~390
6A31	ϕ237×10×1 100	38	5	15~30	6	350~400
5A02	ϕ406×8×3 000	58	3~18	20~35	6	200~350
超高强钢(D6AC)	ϕ800×3×2 000	18	2~5	20~40	5	室温
紫铜管(T2)	ϕ120×3×2 000	10	2~3	30~35	3	室温

表5.7-12 不同材料一道次旋压的极限减薄率 %

牌号	2014	5256	6061	7075	D6AC	18%Ni	Waspaloy	4310	6434
筒形件	70	75	75	75	75	75	60	75	75
锥形件	50	50	75	65	70	65	40	75	65
球形件	40	36	50	50	50	50	35	50	50

(3) 进给率与转速

进给率为芯模每转旋轮沿工件母线的进给量，其表达式见式(5.7-22)。

筒形变薄旋压时，进给率对工件直径的胀缩和工件质量均有影响。进给率适量大有助于缩径；小进给率易扩径，但表面质量较好。过大的进给率易造成旋轮前材料的堆积和起皮。

筒形件变薄旋压的进给率在0.5~3.0 mm/r的范围选取，常用的进给率是0.5~1.5 mm/r。在多道次变薄旋压厚壁管坯时，前期道次受设备能力限制，进给率不宜很大；进给率小易造成工件有一定的扩径量，在随后的道次进给率增加可以减径，提高工件尺寸精度。

在有中间热处理的旋压过程中，热处理后的进给率是控制工件直径，获取高精度旋压件的重要工艺因素。成品前的旋压道次采用大的进给率，使工件贴模。在成品旋压时道次进给率较小使工件略为扩径，有助于脱模和提高表面质量。

在旋轮轴向进给速度一定时，转速高则进给率下降，转速低则进给率上升。转速过高易引起机床振动，变形热量增加，需要大量冷却。转速过低，为保持一定的进给率需用低进给速度配合，机床易出现爬行。

转速与圆周速度相关，合金筒体旋压进给比与转速关系的一些实例见表5.7-13所示。



进给率是最活跃的工艺参数，与变薄率、旋轮结构参数关系密切，是控制工件直径与壁厚的关键参数。一定范围调整进给率可有效控制壁厚尺寸精度。例如在一定工艺条件下，进给比为 1.0 mm/r，壁厚为公差上限，降低进给比为 0.8 mm/r，其壁厚将减小 0.03 ~ 0.05 mm，进入壁厚公差中下限。

为有效控制工件直径，常以工件贴模保证尺寸精度为原则，当旋轮工作角不同时，进给比要相应变化。例如在相同变薄率时，旋轮工作角 25°，其进给比 2.5 mm/r，直径尺寸控制良好。旋轮工作角 30°时，进给比选 1.5 mm/r，可以收到相同效果。

表 5.7-13　合金筒体旋压进给比与转速示例

合金	旋轮结构参数		转速 /r·min^{-1}	进给比 /mm·r^{-1}	圆周速度 /m·min^{-1}
	α_ρ/ (°)	r_ρ/mm			
1A90 热旋	20	10	20	3 ~ 5	60
5A02 热旋	25	50	30	1 ~ 2	40
5A21 冷旋	20	6	800	0.5	100
D6AC 冷旋	25	8	20	1 ~ 3	60
纯铜冷旋	20	8	80	1 ~ 1.5	40

5　力能参数

旋压力是设计旋压工艺、选择旋压机和设计模具时的重要依据。旋压力与坯料尺寸、材料力学性能、变薄率、旋压方式有很大关系；很难用理论分析的方法进行准确的计算。因此，常采用经验公式进行近似计算。

5.1　力学分析

(1) 变形区应力（流动旋压）

筒形变薄旋压时，变形区处于三向应力状态，正旋变形为两向压力和一向拉应力，即径向与切向为压应力，轴向为拉应力，见图 5.7-32a。反旋变形为三向压应力，见图 5.7-32b。正旋时，已变形区承受拉应力；反旋时，未变形区承受压应力；同时，上述两个变形区均承受由于传递扭转力矩所产生的周向剪切应力。

从图 5.7-33 变形区受力状况看出，正旋时，变形区与已变形区的界面上有拉应力 σ_{zf}，变形区与未变形区的界面应力为零。反旋时，在变形区和未变形区的界面上有压应力 σ_{z0}，变形区与已变形区的界面上应力为零，已变形区自由向后移动。

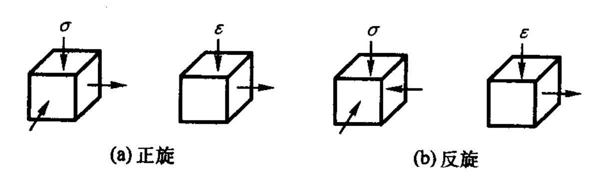


图 5.7-32　流动旋压变形区应力状态简图

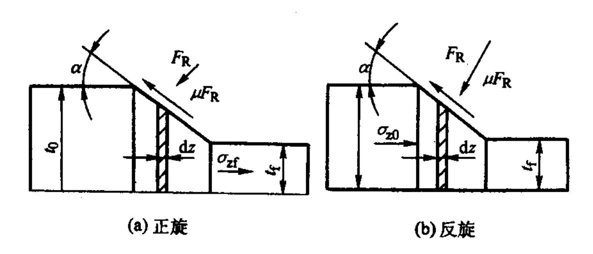


图 5.7-33　流动旋压变形区受力

(2) 力的分解

筒形变薄旋压时，旋压力通过旋轮的工作面均匀地作用于工件和旋轮的接触面上。作用力的合力通过接触面的重心，其方向为接触面重心处的法向。

旋压分力可确定旋压设备所需的功率和进给机构的动力。一般将旋压合力分解为互相垂直的三个分力，即轴向分力 F_L，径向分力 F_R 和切向分力 F_T。图 5.7-34 是简形件旋压时三个旋压分力分解示意图。

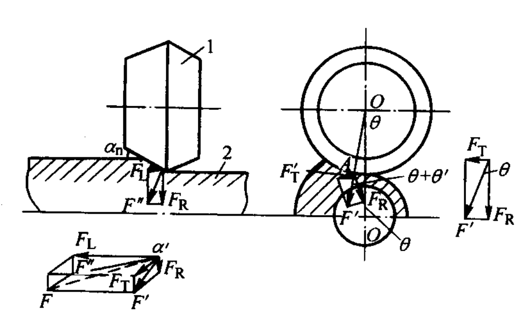


图 5.7-34　三个旋压分力分解示意图
1—旋轮；2—旋压件

由图看出，旋压合力首先分解为轴向力 F_L 和横向力 F'，F' 又可分解为径向分力 F'_R 和切向分力 F'_T，F 与 F' 的夹角为 α'，F' 与 F'_R 的夹角为 $\theta+\theta'$。由图可见，径向分力 F'_R 不平行于旋轮与工件的中心连线 $O'O$。考虑到 θ' 角一般很小，将 F' 分解为 F_R 和 F_T 代替 F'_R 和 F'_T 作为径向分力和切向分力。各分力与合力之间以及各分力之间的关系如下：

$$F_L = F\sin\alpha' \quad (5.7\text{-}24)$$

$$F_R = F\cos\alpha'\cos\theta \quad (5.7\text{-}25)$$

$$F_T = F\cos\alpha'\sin\theta \quad (5.7\text{-}26)$$

根据计算公式，可求出各旋压分力之间的比值，以确定各旋压分力的大小。各旋压分力之间的比例关系如下：

$F_R/F_L = 1/\tan\alpha_\rho$；$F_R/F_T = [D_\rho/(f\times\tan\alpha_\rho)]^{1/2}$；

$F_L/F_T = [(D_\rho\tan\alpha_\rho)/f]^{1/2}$。

根据合金管材旋压常用值，$D_\rho = 100 \sim 300$ mm，$f = 1 \sim 3$ mm/r，$\alpha_\rho = 15° \sim 30°$，可求得：

$F_R/F_L = 2 \sim 4$；$F_R/F_T = 20 \sim 60$；$F_L/F_T = 5 \sim 25$。

5.2　旋压力计算

(1) 普通旋压力

1）模拟试验求解。按相似原理确定，由模拟试验测出旋压力 F'，即可推算出工件的旋压力，即

$$F = F'm_c m_r^2 \quad (5.7\text{-}27)$$

式中，m_c 为力学相似系数，一般取 $m_c = 1$；m_r 为几何相似系数。

算例：已知工件坯料厚 $t_0 = 10$ mm，坯料直径 $D_0 = 1\,000$ mm，转速 $N = 100$ r/min，进给速度 $v = 60$ mm/min。

解：

取 $m_r = 5$，则 $t'_0 = 2$ mm，$D'_0 = 200$ mm。

取 $N = N'$，则 $v' = 12$ mm/min。

取 $m_c = 1$，则 $m_c m_r^2 = 1\times5^2 = 25$。

由模拟试验测得：径向分力 $F'_R = 5\,000$ N，轴向分力 $F'_L = 5\,000$ N，可推算出工件旋压分力 $F_R = F_L = 5\,000\times$



25 N = 125 000 N = 125 kN。

2）屈服线计算法。由变形模型的静态分析得出

$$F=(1/4)\ \sigma_s t_0^2\ [\ (r/r'_0)\ -k]^{-1}\times\ [1+\ (1-2k)^2]\times\ (1+1/k)^{1/2} \quad (5.7\text{-}28)$$

式中，σ_s 为屈服点；k 为 r_1/r'，mm；r_1 为尾顶半径，mm；r'_0 为坯料半径，mm；r 为力的作用点，mm，$r'_0>r>r_1$。

算例：已知工件坯料厚 t_0 = 10 mm，σ_s = 500 MPa，r_1 = 200 mm，r'_0 = 500 mm，r = 300 mm。

解：

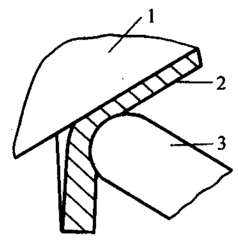
$k=r_1/r'_0=200/500=0.4$；$r/r'_0=300/500=0.6$；代入式（5.7-28）。

F = 0.25 × 500 × 100 × 5 ×（1 + 0.04）× 1.87 N = 121 550 N。

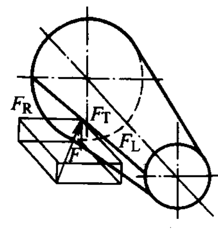
（2）异形件剪切旋压力

异形件剪切旋压力的计算方法较多，有纯剪切变形计算法，纯剪切变形及应变率、功率关系计算法，接触圆弧段纯剪变形计算法，剪切与弯曲叠加变形计算法等。

剪切旋压力计算的假设包括：变形材料各向同性，变形完全符合正弦规律，略去摩擦、温度效应。锥形件旋压变形见图 5.7-35a，三向旋压力分解见图 5.7-35b 所示。



(a) 锥形件旋压变形



(b) 旋压力分解

图 5.7-35 三向旋压力分解示意图

1—芯模；2—工件；3—旋轮

根据工程计算法，简化后切向分力与三向投影面积之间关系如下：

简化后切向分力 $F_T=t_0 f\varepsilon_t\sin\alpha$

轴向分力 F_L 和径向分力 F_R 根据三向投影面积的比例求出，即

$F_L=F_T\times A_L/A_T$；$F_R=F_T\times A_R/A_T$；其中 $F_L>F_R\gg F_T$。

根据已知条件先求出切向分力，再通过三向投影面积，求出径向与轴向旋压分力。

锥形件剪切旋压变形过程中，旋轮圆角挤压坯料使其产生塑性变形的交线近似椭圆，其方程为：

$$(X/a)^2+\ (Y/b)^2=1 \quad (5.7\text{-}29)$$

式中，a 为椭圆的长半轴，mm，$a=\sqrt{r_\rho^2-r_1^2}$，$r_1=r_\rho\sin\alpha-f\cos\alpha$；$b$ 为椭圆的短半轴，mm，$b=\{(D_\rho-2r_\rho)[\sqrt{r_\rho^2-r_1^2\cos^2\beta}-r_1\sin\beta]+r_\rho^2-r_1^2\}^{1/2}$；$\beta$ 为旋轮攻角，(°)。

变形区夹角为θ_0，$\theta_0=\arccos\{b^2/a^2-[1+(b/R_0)^2(b^2/a^2-1)]^{1/2}/b^2/a^2-1\}$；

变形区半径为 R_0（$R_a<R_0<R_b$）。

根据式（5.7-9）、式（5.7-11）代入已知条件计算出三向投影接触面积过程如下。

算例：

取：r_ρ = 20 mm；f = 1 mm/r；α = 45°；D_ρ = 250 mm；β = 40°；R_0 = 200 mm；σ = 500 MPa；t_0 = 100 mm。

则：$r_1=20\sin45°-1\times\cos45°=13.43$ mm；应变 $\varepsilon(\Psi_t)=\cot45°/\sqrt{3}=0.577$。

$a=(20^2-13.43^2)^{1/2}$ mm = 14.85 mm

$b=\{(250-2\times20)[(20^2-13.43^2\times\cos^2 40°)^{1/2}-13.43\times\sin40°]+20^2-13.43^2\}^{1/2}$ mm = 44.89 mm

$$\theta_0=\arccos\{[44.89^2/14.85^2-\sqrt{1+(\frac{44.89}{200})^2(\frac{44.89^2}{14.85^2}-1)}]/[(44.85^2/14.43^2)-1]\}$$

$=\arccos0.977=12.31°\times\pi/180°=0.215$rad

求出三向投影面积如下：

$$A_T=1/2\times1\times20\times\cos^2 45°\text{mm}=5\ \text{mm}^2;$$

$$A_R=1/2\times20\times\ (1-\sin45°)\ \times200\times0.215\ \text{mm}=126\ \text{mm}^2$$

$$A_L=1/2\times20\times\cos45°\times200\times0.215\ \text{mm}=304\ \text{mm}^2$$

求出三向旋压分力如下：

$$F_T=10\times1\times\sin45°\times500\times\cot45°/\sqrt{3}\ \text{N}\approx2\ 041\ \text{N}$$

$$F_L=F_T\times A_L/A_T=2\ 041\times304/5\ \text{N}=124\ 096\ \text{N}$$

$$F_R=F_T\times A_r/A_T=2\ 041\times126/5\ \text{N}=51\ 433\ \text{N}$$

$$F_L>F_R>F_T。$$

（3）筒形件流动旋压

筒形件变薄旋压的应力和变形状态复杂，变薄旋压力计算繁琐。根据工程实用要求，可简化计算。

切向分力：$F_T=N/(2\pi N_m R_n)=t_0 f\sigma\ln[1/(1-\varepsilon_t)]=Kt_0 f\sigma$

式中，R_n 为变形区半径，mm；N_n 为工件转速，r/min；ε_t 为壁厚应变；K 为系数。

根据文献［43］得知，三向分力有如下关系：

$$F_T=Kt_0 f\sigma_m \quad (5.7\text{-}30)$$

$$F_R=F_T\cot\theta \quad (5.7\text{-}31)$$

$$F_L=F_R\tan\alpha_\rho \quad (5.7\text{-}32)$$

旋压力的计算依据三向投影接触面积，其计算因素有材料平均应力 σ_m，旋轮进给比 f，坯料壁厚 t_0，旋轮直径 D_ρ，工作角 α_ρ 及个数 m。每个旋轮的三向旋压分力计算公式如下：

$$F_T=m^{-1}\sigma_m f t_0 \quad (5.7\text{-}33)$$

$$F_R=m^{-\frac{1}{2}}\sigma_m t_0(D_\rho f\cot\alpha_\rho)^{1/2} \quad (5.7\text{-}34)$$

$$F_L=m^{-\frac{1}{2}}\sigma_m t_0(D_\rho f\tan\alpha_\rho)^{1/2} \quad (5.7\text{-}35)$$

算例：

已知：t_0 = 20 mm；f = 1 mm/r；D_ρ = 310 mm；α_ρ = 25°；σ_m = 500 MPa；m = 3。

求解三向旋压分力如下：

切向旋压分力 F_T = 1/3 × 500 × 1 × 20 N = 3 333 N；

径向旋压分力 $F_R=1/3^{1/2}\times500\times20\ (310\times1\times\cot25°)^{1/2}$ N = 148 862 N；

轴向旋压分力 $F_L=1/3^{1/2}\times500\times20\ (310\times1\times\tan25°)^{1/2}$ N = 69 416 N。

计算结果 $F_R>F_L>F_T$。

6 工艺装备

旋压工艺装备有旋压工具、旋压模、尾顶装置、模板装置、切割装置、加热装置及辅助装置等。普通旋压与变薄旋压因变形程度不同，旋轮装置有所区别；筒形件与异形件因形状差异，旋压模外形各异。

锥形件剪切旋压工艺装备见图 5.7-36 所示，芯模外形取决于工件的内形，旋轮形状比筒形件变薄旋压的旋轮简单，以 R 型为主。

锥形件剪切旋压旋轮的圆角半径比普通旋压旋轮的圆角半径小。





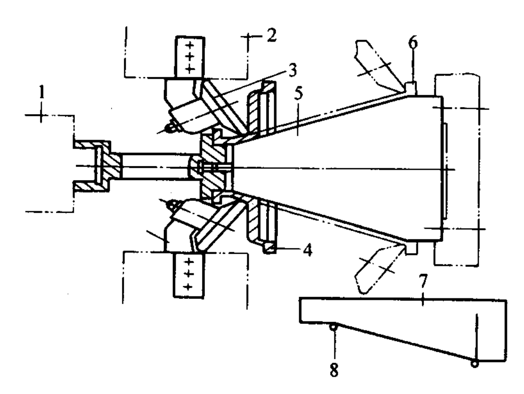


图 5.7-36　剪切旋压工艺装备

1—尾顶；2—旋轮座；3—旋轮；4—预制坯；
5—芯模；6—旋压件；7—仿形板；8—触头

筒形件变薄旋压工艺装备见图 5.7-37。与挤压、拉深相比，变薄旋压工艺装备结构简单，容易制造，成本低廉，调整方便。

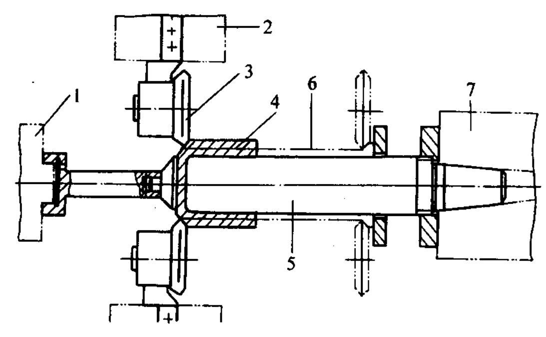


图 5.7-37　流动旋压用工艺装备

1—尾顶；2—旋轮座；3—旋轮；4—预制坯；
5—芯模；6—旋压件；7—机床主轴

6.1　芯模

芯模包括工作部分，与机床连接配合部分，坯料定位及压紧部分。组合模制造复杂，装拆不便。分瓣组合模用于母线中部凸凹的轻型件。分段组合模用于母线中部凹陷的工件。

(1) 要求

旋压芯模工作部分应含名义段和支撑段，支撑段用于卧式旋压无尾顶时。旋压模顶端圆角半径取（0.5～1.0）t_0，并便于装坯料。旋压芯模空载径向跳动应不大于 0.01～0.10 mm。工件成形时，芯模与坯料内表面接触产生轴向滑动摩擦，芯模工作表面宜精磨光滑，以减少轴向摩擦。

变薄旋压芯模有效工作段较简单，其硬度、尺寸精度及表面粗糙度则要求高。

普通旋压芯模硬度和尺寸精度要求不及变薄旋压芯模，有些芯模形状比变薄旋压芯模复杂。

芯模要承受旋压力、尾顶力以及弯矩和扭矩，因此应具有足够的强度、刚度和硬度。

筒形件旋压芯模实例见图 5.7-38。

(2) 分类

施压芯模包括整体模、偏心局部模、内旋局部模、随动局部模、分瓣旋压模及分段旋压模等。不同种类旋压芯模见图 5.7-39。旋压芯模分类详见表 5.7-14。

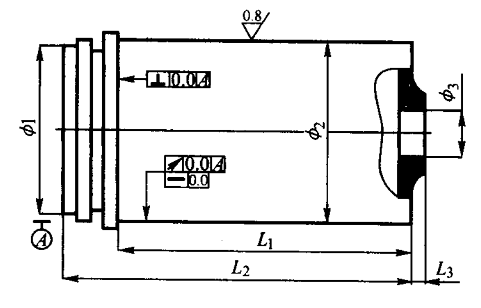
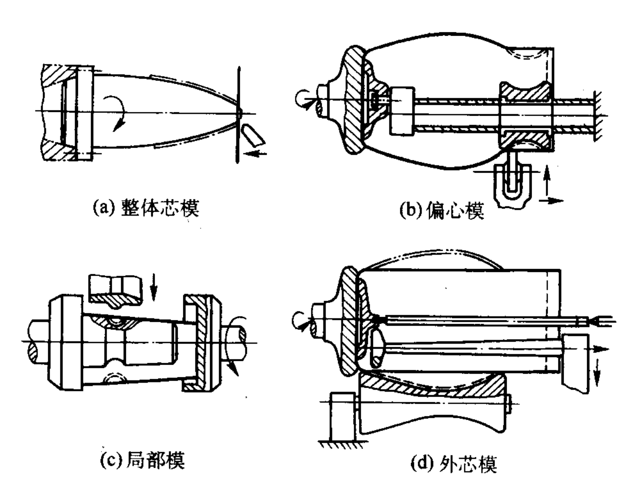


图 5.7-38　大直径旋压芯模

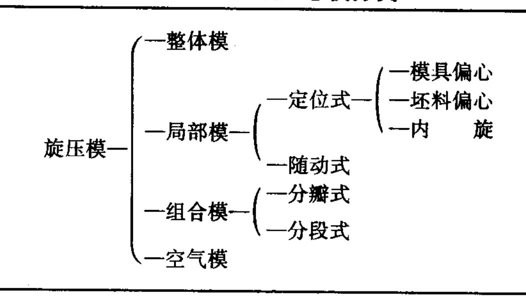


(a) 整体芯模　(b) 偏心模

(c) 局部模　(d) 外芯模

图 5.7-39　旋压芯模

表 5.7-14　旋压芯模分类



旋压模—
- 整体模
- 局部模
  - 定位式
    - 模具偏心
    - 坯料偏心
    - 内　旋
  - 随动式
- 组合模
  - 分瓣式
  - 分段式
- 空气模

(3) 尺寸精度

芯模外形与工件内形基本相同，考虑工件的壁厚回弹和直径胀缩，芯模直径尺寸可参考工件内径公差的中下限。变薄旋压时，工件直径小于 ϕ1 000 mm，芯模直径可比工件内径小 0.2～0.5 mm；工件内径大于 ϕ1 000 mm，芯模直径比工件内径小 0.5～0.8 mm。具体数值要视旋压材料强度而定，如材料强度高则选上限，充分考虑工件的回弹量，反之选下限；同时，可参考表 5.7-10。

芯模表面粗糙度决定工件内表面质量，芯模表面粗糙度一般可达 R_a = 0.8 μm。高强度钢工件旋压成形时，芯模表面硬度应在 58～62 HRC 范围，尤其是大直径薄壁筒形件旋压，芯模表面硬度≥60 HRC，淬硬层应大于 5.0 mm 才能满足旋压工艺要求。

大直径筒体变薄旋压时，芯模设计为空心，壁厚为80～150 mm 之间。旋压强度低的铝合金材料，芯模可采用铸造成形。旋压高强度金属材料，芯模需锻造成形。此时，冷旋芯模表面硬度需大于 55 HRC 以保证旋压筒体内表面高质量。



6.2 旋轮

管材旋压时旋轮与坯料间单位接触压力可高达1 000～3 500 MPa，旋轮需整体淬硬。常用材料为工具钢、高速钢、硬质合金，硬度达60～63 HRC。热旋旋轮采用热模具钢硬度大于55 HRC。

根据机床不同，旋轮外径的范围 $D_\rho = 120 \sim 380$ mm。旋轮外径大，有助于限制坯料横向流动及扩径，可选用较大的旋轮轴承，提高其寿命。旋轮空载径向跳动应在0.01～0.02 mm之间。

(1) 数量

单轮旋压时，相当于变形区在工件圆柱面上沿螺旋线纵向推进，不平衡的径向力影响工件精度。因此，单旋轮工作适宜薄壁、粗短件。双旋轮旋压可平衡径向旋压力，但是细长件仍易出现芯模振动。

三旋轮均布受力最合理，三旋轮均布优于三旋轮非均布。三旋轮旋压增加坯料夹紧的可靠性，减少模具偏心，增加塑性区及有益于应力分布。旋轮不同排列见图5.7-40。三旋轮旋压时，不但径向力可互相平衡，而且变形区由点接触变为近似环形。在旋压成形时，环形变形区在工件圆柱面上沿螺旋线纵向前进，变形条件得以改善，工件的尺寸、形状及表面质量大为提高。

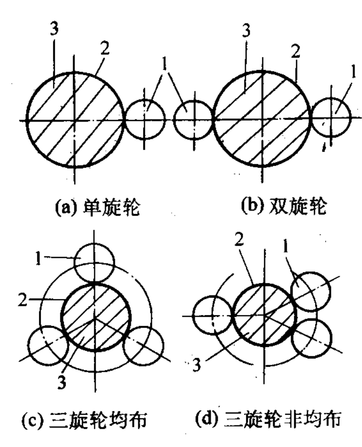


图 5.7-40 旋轮分布示图

1—旋轮；2—工件；3—芯模

(2) 形状

旋轮工作部分外形如图5.7-41。R型旋轮用于旋压延性好的材料以及筒形件。α型和h－α型能避免旋轮前形成的隆起与堆积。成形角 α_ρ 过小易扩径，过大易失稳隆起，常选择的范围是15°～30°。圆角半径 $r_\rho \approx (0.5 \sim 1.5)t_0$，硬材料取小值。

(3) 配置

错距旋压通常是在均布三旋轮旋压时，旋轮相互间沿径向和轴向错开一定距离而成形零件的方法。错距旋压可以在一道次中完成通常几道次完成的工作，使工效成倍提高，并可提高工件直径精度；但总旋压力和主轴功率则相应增大。

错距旋压有两种形式，一是径向错距，二是轴向错距，见图5.7-42。多数错距施压两种形式同时采用。120°均匀分布的三个旋轮错距旋压时；1、2、3三个旋轮径向错开一定距离，轴向也错开一定距离，三个旋轮错距后相当于一道工序完成了三道工序的压下量。三个旋轮错距旋压不但可以保持径向力的平衡，而且可利用三个旋轮错距量的互相搭配

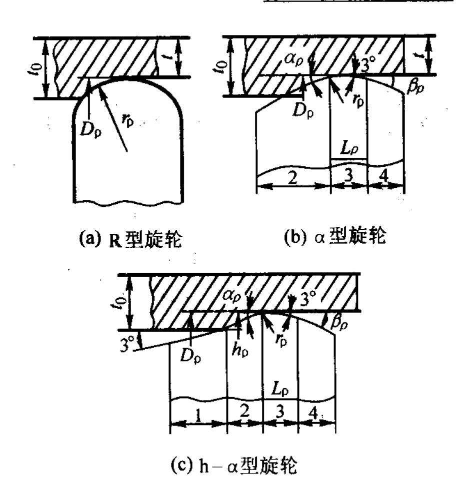


图 5.7-41 旋轮工作部分外型

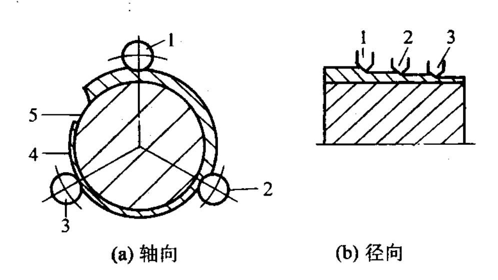


图 5.7-42 错距旋压简图

1、2、3—旋轮；4—工件；5—芯模

创造一个良好的变形区，从而提高变形量和工件的尺寸精度。

采用错距旋压道次变形率大、工序少、效率高、工艺流程短。错距旋压工件的尺寸、形状、表面质量明显提高。

错距旋压过程在均布三旋轮旋压机上已获得广泛应用，在双旋轮旋压机上也可采用。坯料起旋处应预制与多旋轮工作相应的台阶。径向压下量的分配要使各旋轮受力大体相当。

按1、2、3先后顺序排列的旋轮号，错距量尽量小，但不使后轮成形面越过前轮，见图5.7-43所示。

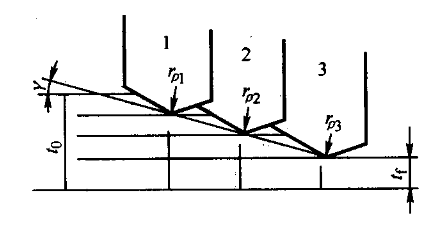


图 5.7-43 一种错距旋压旋轮配置示意图

(4) 旋轮装置

旋轮装置由旋轮、旋轮架、轴承等部分组成，有些旋压机的后两部分已构成机床本体的一部分。根据不同工件的要求，可设计一些专用的旋轮装置和旋轮。

旋轮架安装在旋轮座上并将机床作用力传递到旋轮上，使工件产生塑性变形。旋轮架有单臂式和叉式之分，见图5.7-44所示。单臂式便于更换旋轮，叉式刚性较强。旋轮架又有整体式和组合式区别，其设计应考虑不得与工件、尾顶发生干涉，材料可选用碳素结构钢。

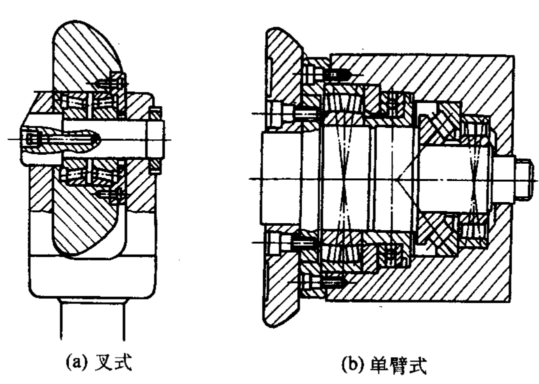


图 5.7-44　旋轮装置

6.3　尾顶

尾顶使芯模多一支点，增加系统刚性。正旋时夹紧坯料防止其与芯模相对转动。尾顶的材料可采用铸铁或碳钢。典型尾顶装置见图 5.7-45，图 5.7-45a、c 为顶块式；图 5.7-45b、d 为顶尖式；图 5.7-45e 为组合式。

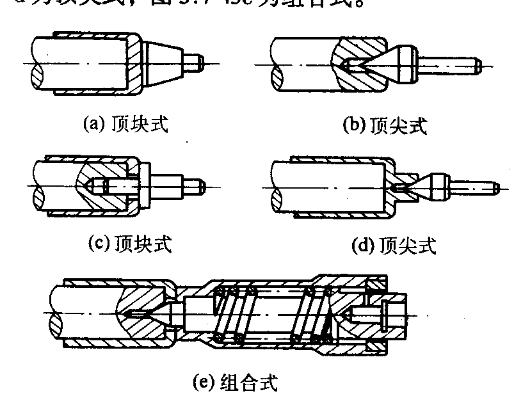


图 5.7-45　尾顶装置的形式

6.4　靠模

靠模用于液压仿形旋压机上，其形式多数呈板状，称为靠模板。靠模板的形状包括引入段、成形段和导出段三部分，见图 5.7-46 所示。引入段使旋轮接触工件前经过一段空行程再转入工作状态，以防止工艺装置间发生干涉。筒形件正旋时，成形段形状尺寸与工件母线形状尺寸相同。筒形件反旋时，当工件母线平直，模板长度可按变薄率相应缩短，如工件母线带凹凸时则应采用反旋跟踪装置；否则，需根据工件的变形量计算变形后靠模板的几何尺寸。

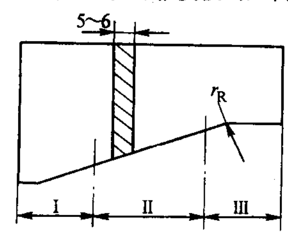


图 5.7-46　典型靠模板

Ⅰ—导出段；Ⅱ—成形段；Ⅲ—导入段

图 5.7-47 所示靠模装置结构简单，其旋压锥角可调。

图 5.7-48 所示为滑动式组合模板，坯料通过滑板控制成形道次，多用于缩旋收径。滑动模板由液压缸带动作平移运动，旋轮完成一道次旋压行程，滑动模板前移一定距离，构成新的旋轮运动轨迹。滑动模板进入固定模板，固定模板完成最后旋压成形。

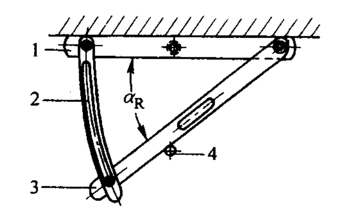


图 5.7-47　组合式靠模板

1—固定板；2—支撑板；3—仿形板；4—仿形触头

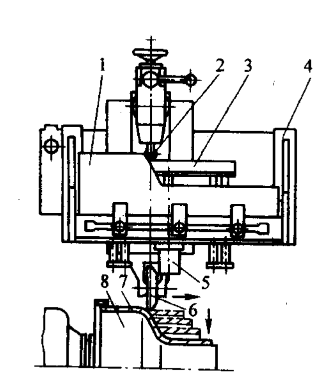


图 5.7-48　滑动式模板组合

1—固定板；2—滚轮；3—滑动模板；
4—支架；5—液压缸；6—旋轮；7—工件；8—芯模

图 5.7-49 所示为摆动式组合模板，通过摆动模板控制坯料到成品的多道次变形过程，多用于平板坯料普通旋压成形，见图 5.7-47b。摆动模板的摆动板装于主板下面旋轴上，主板由模板架夹住，旋轮往返一次，摆动模板进给一个角度，提供旋轮一个新的运动轨迹。工件经逐次变形，最后由主板完成最终成形。

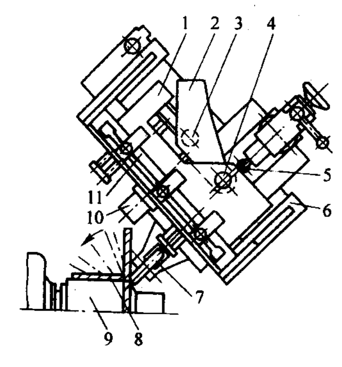


图 5.7-49　摆动式组合模板

1—主板；2—摆动模板；3—传动轮；4—削轴；5—滚轮；
6—支架；7—旋轮；8—工件；9—芯模；10—液压缸

6.5　加热装置

加热旋压的主要方法有火焰加热，电阻加热，高频、中频大电流加热以及辐射加热等形式。加热要迅速，并能够实现局部加热或大面积均匀加热。在机床上加热坯料便于在热旋过程中有效调节和控制旋压所需的温度。

大直径厚壁铝筒用液化石油气火焰加热旋压，成形效果很好；选择高质量柴油加热，其加热温度约达 500℃。在热旋高强度合金时，可采用氧乙炔火焰加热，工件加热温度可达 700～800℃。

热旋高强钛合金可采用液化石油气预热芯模和坯料，用氧乙炔火焰加热旋压，前者大面积保温，后者短时升温，适合热旋开坯。



测温可采用红外测温仪。还可设置具有测温、反馈、调节、控温功能的自动温度控制系统。

加热旋压时，对机床、旋轮和芯模的轴承要备有热防护措施以及冷却系统；轴承要用高温油润滑，保证润滑效果。

6.6 冷却与润滑

变薄旋压摩擦剧烈，冷却液供量需达 300～600 L/min，以免影响产品的直径精度和直线度。

润滑剂的作用是防止坯料与工具摩擦、粘结。冷旋常用皂化油和机油润滑冷却。热旋润滑剂采用二硫化钼效果良好。常用旋压润滑剂参见表 5.7-15。

表 5.7-15 常用旋压润滑剂

坯料	工艺	润滑剂
铝、铜及其合金	冷旋	机油、皂化油、白蜡、肥皂
铝铜及其合金、钢及其合金	热旋	二硫化钼
钢及其合金	冷旋	机油、氯化石蜡

7 旋压机

7.1 特点

旋压机要完成旋转和进给两项主要动作，其特点如下。

1) 旋轮座具有足够的径向和轴向拖动力，以克服较大的径向和轴向旋压分力。可采用 2～3 个旋轮同时工作，以平衡径向旋压分力。

2) 主轴具有足够的传动功率，采用重型滚动轴承，以承受高转速下的转矩、旋压力和尾顶力。

3) 床身、主轴箱、尾座、旋轮座具有足够的刚度，减少机床的弹性变形和振动。

4) 尾座具有足够的压紧力，要防止坯料相对芯模转动，提高机床转动部分的系统刚性。

5) 机床的电气、液压数控系统，以及仿形和同步系统保证各项动作的完成。

旋压设备与旋压工艺密不可分，旋压机主要有普通旋压机和强力旋压机，并有立式、卧式之分。按旋轮数量又有单、双、三旋轮旋压机。按产品形状又分为筒形件旋压机和异形件旋压机。

普通旋压机既可进行多道次单向进给，又能双向往复进给。如设置防止失稳的反推装置，可在高转速、大进给下保持工作平稳性。

筒形件旋压机立式与卧式特点各异，立式旋压机的芯模与旋轮容易对中，芯模自重不影响挠度，工装模具吊装方便。卧式旋压机芯模与旋轮对中虽不及立式，但采取一定措施可旋压超长管材。

精密异形件剪切旋压机，要能保持恒线速度和恒进给率。在旋制高精度曲母线工件时，旋轮安装角要能随工件型面曲线的变化而自动调整，以保证变形的稳定性。

7.2 结构组成

旋压机基本系统组成包括机械、液压、电控、数控、加热和冷却几大系统。机械结构包括床身、主轴箱、尾座、旋轮座四个基本部分。

(1) 机械结构

1) 床身。床身是旋压机重要受力部件，多采用米字形加强筋，以增加其抗拉、抗压、抗扭的能力。加强筋的尺寸和分布可采用模拟试验确定。

2) 主轴箱。主轴箱的主轴变速分为有级变速与无级变速，或是两者相复合，多数采用有级变速，无级变速范围小于有级变速。主轴箱和变速箱多为独立，有的卧式旋压机则将两者合在一起。主轴的作用是带动工件旋转，有的也兼作轴向进给之用。主轴重心应靠近径向轴承，止推轴承要靠近主轴前端。

3) 旋轮座。旋轮座由滑座、导轨、控制装置等组成。旋轮座有鞍座式、框架式、转盘式和转臂式等。

鞍座式旋轮座可调整环节多，适用多用途旋压机；其床身和旋轮座导轨需承受很大径向旋压分力和力矩，轨面磨损加剧。鞍座式旋轮座多用于异形件旋压。

框架式结构的旋轮座可以克服上述不足，由于旋轮均布于刚性框架之中，径向旋压分力得以平衡。当三旋轮非均布时，采用浮动式框架可改善径向旋压分力对导轨面的影响，因为旋轮框架与旋轮座纵滑块不是刚性连接，是通过垂直于机床轴线的滑动导轨相连。框架式旋轮座适用于筒形件变薄旋压。

转盘式结构的旋轮座与三爪卡盘相似。三个旋轮安装在三个旋轮座上，三旋轮径向进退依靠转盘控制斜角楔块的升降来实现。转盘式旋轮座多用于立式旋压机，可旋压薄壁高精度管材。

转臂式旋轮座结构是一个沿水平轴线摆动的转臂，转臂上装有旋轮驱动液压缸。转臂的摆动由两个套筒形液压缸驱动。转臂式旋轮座多用于瓶体收口及异形件旋压。

4) 尾座。尾座承受很大的轴向力和倾侧力矩，其长度应不小于中心高的 1.5 倍。尾座移动液压缸和顶紧液压缸要分开，移动液压缸在下层，顶紧液压缸在上层。尾座锁紧要可靠，以防工件与芯模相对转动以致甩出；尾座是卧式旋压机的重要组成部分。

(2) 控制系统

控制系统包括液压、数控等。液压系统由油箱、泵站、管路和阀体等组成。拖动液压缸的供油路应分开，可避免工作的各液压缸相互干扰。

液压调速宜采用回油路节流方式，回油腔形成背压起阻尼作用，使运动平稳。

旋轮座纵、横液压缸供油可采用正弦分配器合理匹配纵、横液压缸的供油量，使纵、横油泵相互补充，合理利用。

双旋轮同步液压控制包括纯液控和电液随动控制，两者均有压力同步和速度同步之分。压力同步结构简单，能自动进入位置同步。不足点为灵敏度低，受摩擦力的影响大。速度同步是依靠速度差信号调节，使之同步。速度同步与摩擦阻力无关，适应性广，灵敏度高，但系统复杂。

近年运用先进的设计方法，采用先进的数控模块和液压伺服模块取代了液压仿形控制系统，选用优质元器件，实现了旋压机的升级换代。

7.3 设备类别

国内旋压机系列见表 5.7-16～表 5.7-21。PD 和 VPS 为系列带轮专用旋压机，W83K 为专用一步法封头旋压机，WT 为专用二步法封头旋压机。



表 5.7-16 国产旋压机系列之一

型号	结构	控制方式	中心高/mm	吨位/kN	转速/r·min⁻¹	质量/t
PX-1	单轮卧式	液压仿形	350	20	200~1 120	~
SY-2	单轮卧式	液压仿形	600	40	16~630	8
SY-2A	单轮卧式	液压仿形	600	40	16~630	11
SY-3	双轮卧式	液压仿形	630	200	16~630	35
SY-4	双轮卧式	液压仿形	400	200	63~400	30
SY-5	三轮卧式	液压仿形	~	150	100~300	28
SY-6	双轮卧式	液压仿形	750	400	16~400	125
SY-7	单轮卧式	示教录返	250	30	100~300	5
SY-8	单轮卧式	CNC	600	150	0~800	10
SY-10	双轮卧式	CNC	600	500	10~500	130
SY-11	三轮卧式	CNC	700	600	20~200	140
SY-12	三轮卧式	CNC	1 030	300	80~300	50
SY-14	三轮卧式	CNC	500	160	80~700	36
PDZ-2	双轮卧式	PLC	~	250	140	4

注：北京航空工程研究所研制。

表 5.7-17 国产旋压机系列之二

名 称	加工范围/mm	主要技术参数	备 注
QX-1三旋轮立式旋压机	最大外径 ϕ240，最小内径 ϕ40，壁厚 0.35~7	主机功率 40 kW，最大旋压力 150 kN	筒形件冷旋
QX-2三旋轮立式旋压机	最大外径 ϕ1 800，长度 4 000，壁厚 1.0~80	主机功率 120 kW，最大旋压力 800 kN	筒形件与锥形件冷旋与热旋
QX-3三旋轮卧式旋压机	异形件最大外径 1 500，筒形件 ϕ600×5 000	主机功率 75 kW，最大旋压力 600 kN	筒形件与异形件普旋、冷旋、热旋
QX-20三旋轮卧式旋压机	筒形件最大外径 ϕ300×3 000，壁厚 0.5~20	主机功率 75 kW，最大旋压力 200 kN	筒形件冷旋与热旋

注：北京有色金属研究总院研制（QX-20型为联合研制）。

表 5.7-18 国产旋压机系列之三

型号	中心高/mm	旋压力/kN	行程/mm	主机功率/kW	直径/mm	台数
XY-150	250	~30	400~150	11	300	3
XYS6-340	320	~60	340~160	15	360	1
QX63-450	500	~300	1 200~250	75	500	3
PX-600	600	~60	500~400	17	1 000	6
PRX-450	450	~30	400~250	11	600	1
QX62-90	320	~70	500~160	15	360	2
QX62-250	600	~200	2 200~260	55	560	1
QX62-350	600	~350	1 000~370	75	700	2
XK-690	690	~130	1 100~260	30	1 100	1
PNC-690	690	~130	1 100~260	30	1 100	1
XK-300	600	~300	1 000~280	75	1 000	1

注：长春五五研究所研制。



表 5.7-19 VPS带轮旋压机技术参数与加工范围

(1) 技术参数			
技术参数	数值	技术参数	数值
垂直缸压力/kN	300	泵站功率/kW	5.5
旋轮压力/kN	100	主轴转速/r·min⁻¹	100~500
主电动机功率/kW	15	主机净重/kg	~4 000
(2) 加工范围			
带轮型式	槽 数	直径/mm	板厚/mm
折叠式	单槽	60~250	1.0~2.5
折叠式	双槽	100~250	1.5~2.0
折叠式	三槽	120~250	1.5~2.0
滚压式	齿型带轮	100~250	2.5~3.0

注：北京航空航天大学研制。

W83K型系列封头旋压机，三轮卧式旋压机，带轮旋压机，卧式内旋压机示意图见图5.7-50a、b、c、d。

表 5.7-20 封头一步法旋压机技术参数

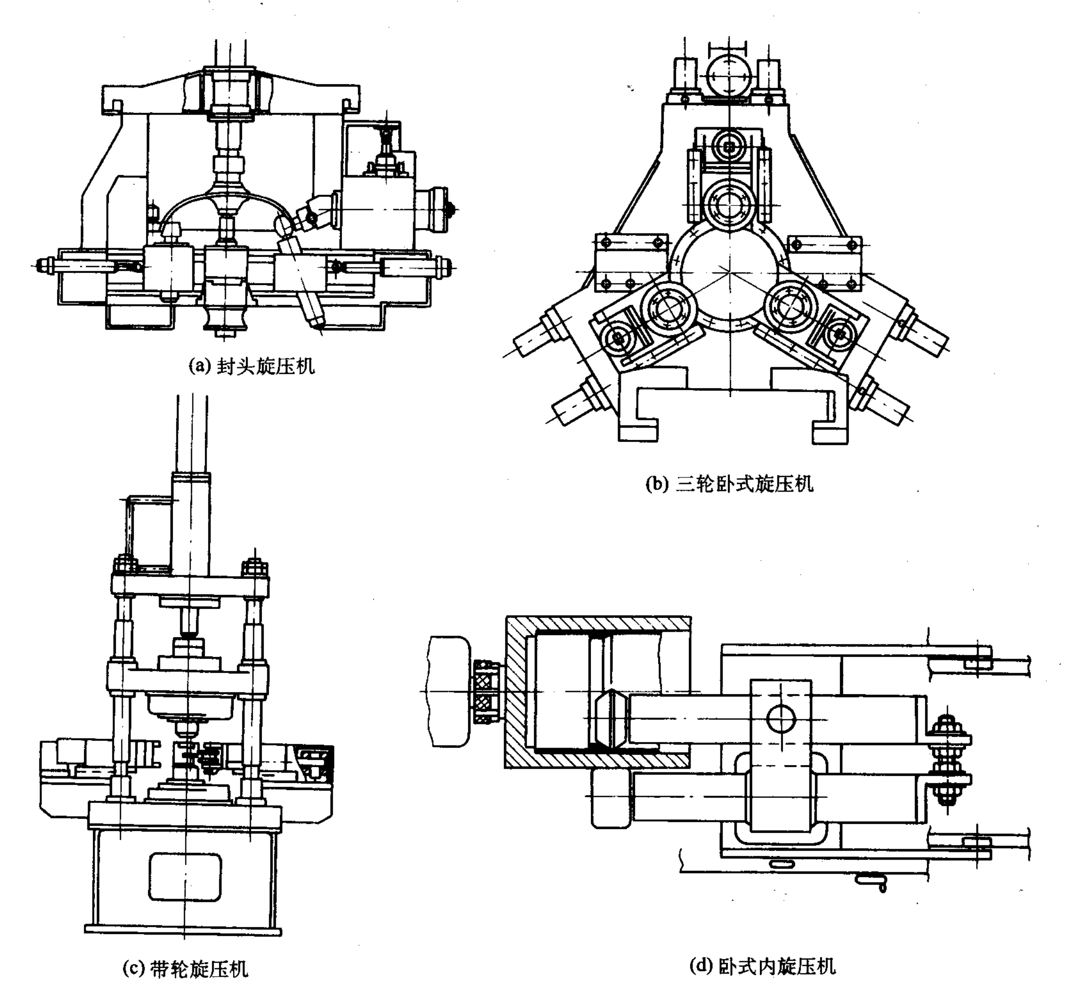
W83K型号	800×8	1600×14	2400×20	3200×25	5000×30	5200×30
驱动功率/kW	4/5.5	16/22	75	75/100	100/130	100/130
最大直径/mm	1 000	1 900	3 000	4 000	6 000	6 000
最大板厚/mm	5/8	10/14	12/20	14/25	18/30	18/30

注：黑龙江旋压技术研究所研制。

表 5.7-21 封头两步法旋压机加工范围 mm

机组型号	WT4500-26	FX5200-32	WT6500-32	WT6800-32	WT7500-32	WT8000-35	WT10M-35
最大直径	4 500	5 200	6 500	6 800	7 500	8 000	10 000
最大板厚	26	32	32	32	32	35	35

注：哈尔滨工业大学研制。



(a) 封头旋压机 (b) 三轮卧式旋压机 (c) 带轮旋压机 (d) 卧式内旋压机

图 5.7-50 旋压机结构示例



7.4 设备能力

旋压机的旋压制品规模与精度是设备水平高低的标志之一。美国赫福特立式旋压机变薄旋压筒形件规格为 ϕ3 048 mm× 3 600 mm，其壁厚精度是 ± 0.062 mm。HUFFORD – 60 型立式旋压机旋制 ϕ1 524 mm × 1 524 mm 筒形件，壁厚精度是 ± 0.02 mm。西德来菲尔德 ST56 – 75 旋压机旋制 ϕ500 mm × 1 × 2 000 mm 筒形件，壁厚精度为 ± 0.01 mm。

国内三梁四柱立旋机，芯模浮动绞连接，旋轮盘式进给结构，旋压薄壁高精度管材，其壁厚精度达到 0.01 mm，与日本同类产品精度相当。

目前国内旋压机最大旋压力可达约 800 kN，旋压最大直径 ϕ2 000 mm，最长筒形件为 4 000 mm；旋压圆筒展开可成形3 500 mm × 3 500 mm 的宽板。立式旋压机可加热旋压铝合金最大坯厚近 100 mm，卧式旋压机可旋压高强度钢坯厚 30 mm。旋压封头最大直径可达 ϕ8 000 ~ 10 000 mm，坯料壁厚大于 30 mm。

8 旋压件的质量控制

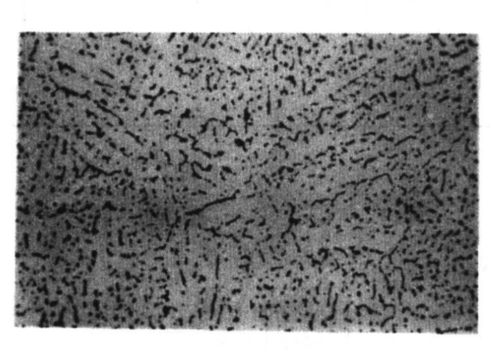
8.1 组织结构

（1）组织结构

变薄旋压之后晶粒细化，并沿着轴向变形拉长，形成方向明显的加工流线。当减薄率较大，毛坯厚度较薄时，沿厚度方向的变形比较均匀。反之，沿厚度方向的变形不均，外层的组织细化超过内层，流线分布密度出现外层向内层递减。当旋压变薄率大于 40%时，壁厚变形组织的均匀性基本一致。随着变薄率的增加，工件晶粒细化加强；同时，材料中的夹杂物形态被破碎或拉长，减轻了对旋压件强度的影响。

加热变薄旋压时，当温度接近再结晶温度，由于在变形过程中不断发生再结晶现象，使材料趋向于恢复原组织状态，材料旋后的金相组织变化不显著。

铝及其合金的管材旋压变形对工件组织的影响见图 5.7-51 所示。


(a) 铸造

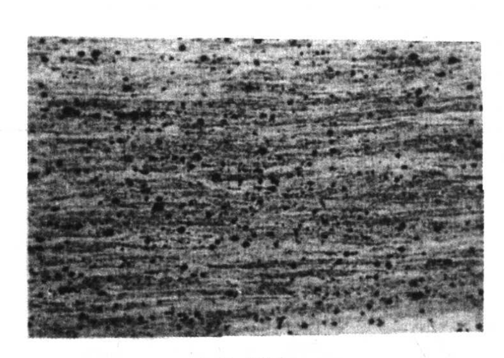

(b) 旋压

图 5.7-51 铝合金（5A02）金相组织的变化（× 100）

铝合金铸态组织是枝状晶粒，见图 5.7-49a；旋压加工为细长晶粒，见图 5.7-49b。如采用板材卷焊管坯，旋压加工后的组织细化更为明显，当减薄率为 60%，变薄旋压组织显著致密，加工流线清晰。

8.2 力学性能

旋压件金相组织的变化带来力学性能的差异。金属材料变薄旋压后，强度指标提高，塑性指标降低。此外，材料的电阻率增大，导热率和导磁率降低，内应力使材料抗腐蚀性降低。

铝合金旋后强度及疲劳性能变化见表 5.7-22 与 5.7-23 所示。

表 5.7-22 3A21 旋压前后的性能变化

性能	σ_b/MPa	δ/%	Hv
旋前	125	22.5	439
旋后	190	14.3	578
旋后退火	169	16.8	489

表 5.7-23 2A12 旋压前后疲劳性能变化

纤维方向	试件状态	循环次数 n	循环时间/min	应力值 σ/MPa
纵向	旋前	1 826 ~ 2 469	1.75 ~ 2.67	233
	旋后	23 863 ~ 79 890	20.42 ~ 94.4	271
横向	旋前	305 ~ 13 579	0.37 ~ 12.75	200
	旋后	7 550 ~ 56 908	7.17 ~ 61.17	256

8.3 尺寸精度

管材旋压的尺寸精度包括直径精度，壁厚精度及长度等。旋压件的直径精度有内径与外径之分，壁厚精度有壁厚偏差和壁厚差之别，壁厚偏差是壁厚的实际尺寸相对于名义公称尺寸的差别，壁厚差是壁厚实际尺寸之间的差值，它与壁厚的名义公称尺寸无关。表 5.7-24 为铝管变薄旋压尺寸精度。

影响旋压件尺寸精度的主要因素如下。

1）简单的小规格工件尺寸精度容易提高；反之则低。

表 5.7-24 旋压工件尺寸精度

工件直径 /mm	内径椭圆 /mm	外径椭圆 /mm	母线直线度 /mm·m^{-1}	材料/温度
80	0.02 ~ 0.5	0.2 ~ 0.8	0.10 ~ 0.20	2A85/冷旋
260	0.5 ~ 1.0	0.5 ~ 1.0	~ 0.30	2A85/冷旋
406	0.5 ~ 1.0	0.5 ~ 1.5	~ 0.50	5A02 温旋
520	0.04 ~ 0.20	0.05 ~ 0.50	0.20 ~ 0.50	5A06 热旋

2）坯料椭圆度与壁厚差小，则有利于保证尺寸精度。

3）芯模与旋轮加工尺寸精确，是旋压高精产品的基础。

4）合理工艺参数有效控制，工件收径贴模可获取高精度产品。



5）主轴偏摆与导轨间隙小，设备的精度与状态良好，旋压产品精度高。

6）芯模与主轴良好配合，旋轮轴间隙合理，即设备与工装精确调整有助于旋压件尺寸精度的提高。

① 内径精度。筒形件旋压内径尺寸决定于芯模的直径、毛坯的内径以及旋压过程中扩径和收径的控制。内径尺寸精度取决于工件适当的收径和良好的贴模。扩径是材料周向流动比例增大的结果，扩径不仅使工件内径尺寸增大，而且造成较大的椭圆度与弯曲度。常见筒形件内径的尺寸公差见表5.7-25。

表 5.7-25 筒形件内径的尺寸允许公差 mm

内径	壁厚	内径公差	椭圆度≤	1 m长弯曲度≤
100～150	≤1.0	±0.10	0.05	0.20
	1.0～2.0	±0.10	0.05	0.15
	>2.0	±0.15	0.10	0.15
151～250	≤1.0	±0.10	0.10	0.35
	1.0～2.0	±0.10	0.12	0.25
	>2.0	±0.15	0.15	0.25
251～400	≤1.0	±0.20	0.20	0.45
	1.0～2.0	±0.25	0.25	0.45
	>2.0	±0.25	0.30	0.45

② 直径精度。常见大直径筒形件直径精度见表5.7-26。经验数据表明，工件直径每增大10 mm，直径误差约增大0.01 mm。

③ 壁厚精度　旋压件的壁厚偏差与壁厚差互相关联。壁厚偏差允许范围用正负公差的形式表示；壁厚差允许的大小用最大差值的形式表示，壁厚合格的旋压件，壁厚差应小于壁厚公差范围。

强力旋压件的壁厚精度可控制在±0.03～±0.05 mm，严格控制设备和工艺条件可达到0.01 mm以内。高精度小规格工件壁厚公差见表5.7-27。

旋轮与芯模之间的间隙决定旋压件的壁厚，因回弹影响，旋压件的壁厚大于间隙，其差值为回弹量Δt。影响回弹量的因素有：芯模和旋轮的刚性，坯料的厚度与性能，以及工艺参数等。只有设备系统稳定，才能有效控制壁厚公差。

表 5.7-26 常见筒形件直径精度 mm

产品直径	一般要求	特殊要求
～610	±0.4～0.8	±0.025～0.127
611～914	±0.8～1.2	±0.127～0.254
915～1 219	±1.2～1.6	±0.254～0.381
1 220～1 829	±1.6～2.4	±0.381～0.508
1 830～2 439	±2.4～3.2	±0.508～0.635
2 440～3 049	±3.2～4.0	±0.635～0.762
3 050～5 334	±4.0～4.8	±0.762～1.016
5 335～6 604	±4.8～7.9	±1.016～1.270
6 605～7 925	±7.9～12.7	±1.270～1.524

表 5.7-27 高精度小规格工件壁厚公差 mm

工件公称厚度	公称厚度极限偏差	
	筒形件	曲母线或锥形零件
<1	±0.02	±0.03
1～5	±0.025	±0.035
5～8	±0.03	±0.04
8～12	±0.035	±0.05
>12	±0.04	±0.05

8.4 缺陷及消除措施

旋压件的缺陷主要源于旋压工艺参数采用不合理和旋压工装选择不当所致。普通旋压成形如果旋轮运动轨迹控制不合理，旋轮攻角或工作圆角半径不合适，易导致工件变形失稳、起皱、折叠、破裂等缺陷。

变薄旋压成形的因素复杂，在工艺要素采用不当时，变形区出现塑性流动失稳，导致堆积，工件易起皮；变形速度过慢工件易出现扩径与椭圆。筒形件变薄旋压工件的主要缺陷有起皮、波纹、粘结、鼓包、龟裂、断裂等。其产生原因及消除方法见表5.7-28。

表 5.7-28 旋压工件常见缺陷及其消除方法

缺陷种类	产生原因	消除方法
起皮	变薄率过大，进给比过快，旋轮工作角偏大，无趋进角；旋轮不光及润滑不充分	适量降低Ψ_t，f，α_ρ，使用带趋进角旋轮；出现起皮及时修除，抛光旋轮表面，充分润滑冷却，防止粘结
波纹	芯模偏摆较大，不圆及转速过高；系统油路含气；设备刚性差	适量降低转速，排放油路气体，减小变形量，或加热旋压
鼓包	进给比过较小，工件扩径和椭圆度大，变薄率过大	适量增加进给比，控制工件收径，降低椭圆度，下调变薄率
裂纹	变薄率，进给比，旋轮工作角同时较大；减薄量大于旋轮趋进带压下量	适量选择变薄率，进给比，旋轮工作角，以变形不失稳为原则



9 旋压实例

9.1 ϕ356 mm 封头普旋

(1) 旋压方式

封头可以普通旋压成形，也可强力旋压成形；多数封头采用普通旋压成形，大型封头则采用无模旋压。

从坯料的加工，材料的利用率及简化工艺考虑，普通旋压优于强力旋压。封头拉深旋压是普通旋压应用最广泛的成形工艺，ϕ356 mm×4 mm 不锈钢封头选用加热拉深旋压成形工艺。

(2) 坯料计算

封头拉深旋压成形坯厚约有5%的减薄率，从而引起表面积的增大，坯料直径的选择可比理论计算值小约3%，ϕ356 mm 封头坯料的直径计算结果见表 5.7-29 所示。

表 5.7-29 ϕ356 mm 封头坯料直径计算结果 mm

方法	求弧法	模锻法	经验公式	实测法	试验坯料
公式	弧度×$R+2H_f$	$(8\sum L_x)^{1/2}+2H_f$	$D_f\times1.2+2H_f$	测模具母线	平均值+工艺余量
结果	484	464	451	454	460

注：R—封头圆弧曲率半径；D_f—封头直径；H_f—封头直线段长度；L_x—x 坐标对应的母线长度 L。

(3) 芯模设计

封头芯模设计有作图法和坐标法之分，作图法适宜标准椭球比和三心圆封头旋压的芯模设计，特点为快捷方便。坐标法根据封头椭圆方程计算 x、y 轴的相应数值，逐点连线为芯模型面。坐标法精确度优于作图法，误差在封头的肩部，ϕ356 mm 封头的芯模采用两种方法比较，误差值约为 3.0 mm。

(4) 旋轮轨迹

封头拉深旋压以径向拉延过程为主，易出现径向压缩而失稳起皱，需要若干道次成形，每道次旋轮轨迹可按渐开线运动。

旋轮轨迹按渐开线运动时，渐开线的方程为 $X=a(\cos\beta+\beta\sin\beta)$，$Y=a(\sin\beta-\beta\cos\beta)$，$a$ 为基圆半径，$a=2(L+x_m)$；L 是旋工件的母线长度；x_m 是摆动中心 P 点距芯模端面的距离 β 是起点仰角。

ϕ356 mm×4 mm 封头旋压时，渐开线基圆半径 a 为 920 mm 可以有效控制失稳现象。旋压道次在 5～10 道次之间，进给比约为 2.5 mm/r，每道次下移角度近 3°，间距为 10 mm，拉旋效果良好。

(5) 失稳现象

封头拉旋失稳起皱有三个阶段，一是开始起趋，二是波浪形成，三是波皱加深，这三个过程是连续的。波皱发展趋势有二，一是碾压重叠形成死皱，二是展平活皱消除波皱。旋轮安装角 β 介于芯模弧面和圆柱段之间，取 $\beta=40°$ 对控制封头拉旋失稳是有利的。旋压温度在均匀加热的基础上，初旋时坯料外圈温度略低，保持强度抗失稳；终旋时坯料外圈温度偏高，以利于展平活皱。

9.2 筒形件变薄旋压实例

(1) 纯铝筒体旋压

1) 产品规格及成形　漂白塔和高压釜是直硝法生产硝酸的化工设备。漂白塔和高压釜用材为 1A90/(LG_1)。所需筒体规格为 ϕ840 mm×16 mm×2 770 mm 和 ϕ1 040 mm×25 mm×3 000 mm。采用离心浇铸空心锭，加热变薄旋压。离心铸坯经热开坯旋压，能充分细化晶粒，消除铸态组织；再经冷旋强化组织与性能，筒体加工组织流线连续，组织致密，可提高大直径薄壁筒体的使用性能。

2) 工艺流程及参数　漂白塔用大直径无缝铝筒旋压工艺流程如表 5.7-30，变薄旋压成形圆筒尺寸见表 5.7-31。

高压釜用大直径无缝铝筒旋压工艺流程如表 5.7-32 所示，旋压工艺参数见表 5.7-33。

表 5.7-30 漂白塔用大直径无缝铝筒旋压工艺流程

序号	工序名称	主要参数
1	离心铸坯/mm	ϕ970×95×800
2	旋压坯料/mm	ϕ966×80×790
3	加热旋压/℃	350～400，变薄率 57.5%
4	切上下口/mm	定尺规格 ϕ874×34×1 550
5	室温旋压/mm	变薄率 50%，$\phi_{内}$ 806×17×3 000
6	产品定尺/mm	定尺规格 ϕ840×17×2 700
7	成品退火/℃	250～300，1 h 保温后空冷

表 5.7-31 旋压无缝铝筒尺寸公差 mm

项目	技术指标	实际尺寸	平均数值
内径	$\phi808^{+2}_{-3}$	805～810	807.5
壁厚	16^{+3}_{-2}	14～18	16
长度	$2\,700^{+10}_{-00}$	2 700～2 710	2 705
直线度	≤2	≤2	≤2

表 5.7-32 高压釜用大直径无缝铝筒旋压工艺流程

序号	工序名称	主要参数
1	离心铸坯/mm	ϕ1 190×125×990
2	旋压坯料/mm	ϕ1 170×90×970
3	加热旋压/℃	350～400，变薄率 50%
4	切上下口/mm	定尺规格 ϕ1 080×45×1 550
5	室温旋压	变薄率 45%
6	产品定尺/mm	定尺规格 ϕ1 040×25×3 000
7	成品退火/℃	250～300，1 h 保温后空冷

表 5.7-33 高压釜用大直径无缝铝筒旋压工艺参数

道次	压下量 /mm	变薄率 /%	转速 /r·min⁻¹	进给比 /mm·r⁻¹	温度 /℃	备注
1	4	5	18	5	400	减壁
2	10	11	16	3	390	减壁

续表 5.7-33

道次	压下量 /mm	变薄率 /%	转速 /r·min⁻¹	进给比 /mm·r⁻¹	温度 /℃	备 注
3	整形		20	7	380	收径
4	10	13	16	3	360	减壁
5	整形		20	7	340	收径
6	10	15	18	2~3	340	减壁
7	整形		20	5~7	320	收径
8	10	18	18	2~3	320	减壁
9	5	12	20	1	室温	减壁
10	15	30	20	1	室温	减壁
11	整形		22	1	室温	收径

(2) 耐热铝管材旋压

耐热铝合金铸造管坯内部气孔较多，致密度差，经挤压变形使气孔弥合，析出相细化，有助于变薄旋压成形。采用喷射沉积耐热铝合金铸坯，经挤压变形致密组织后，可热旋成形管材。

喷射沉积铸坯规格为 ϕ630 mm×130 mm×750 mm，挤压成形规格为 ϕ416 mm×20 mm×1 500 mm。机加旋压坯料尺寸为 ϕ410 mm×15 mm×300 mm，可热旋成形 ϕ387 mm×3.5 mm×1 200 mm 管材。

旋压管材退火前后道次变薄率应小于 20%，累计变薄率约 50%进行消除应力退火。旋压筒体工艺参数见表 5.7-34。

表 5.7-34 典型工艺参数

道次	间隙 /mm	减壁 /mm	道次变薄率/%	累计变薄率/%	旋温 /℃	终温 /℃	进给比 /mm·r⁻¹
1	13.5	1.5	10	10	380	300	2.5
2	11.5	2.0	15	23	350	280	2.5
3	9.0	2.0	17	40	350	260	2.5
4	7.0	2.0	20	53	350	250	2.5
5	6.0	1.0	14	60	350	280	2.5
6	5.0	1.0	17	66	350	270	3.0
7	4.0	1.0	20	73	320	260	3.5
8	3.5	0.5	13	76	300	250	1.5

(3) 5A06 管材旋压

5A06 合金挤压坯的组织致密度优于离心铸坯。大直径厚壁管材旋压成形，热容量较大，保温性能好，选择热旋变形抗力低，利于塑性变形。

5A06 薄壁管规格为 ϕ540 mm×8 mm×1 500 mm，厚壁管规格 ϕ534 mm×20 mm×2 000 mm 和 ϕ379×15×1 500 mm，其热旋压工艺参数见表 5.7-35。

表 5.7-35 5A06/（LF6）热旋参数

项目	薄壁工件	厚壁工件	
产品尺寸/mm	ϕ540±0.2 ×8×1 500	ϕ534×20 ×2 000	ϕ379×15 ×1 500
坯料尺寸/mm	ϕ577±0.2 ×27×600	ϕ599×52 ×650	ϕ409×30 ×1 000
芯模尺寸/mm	ϕ522±0.2 ×200	ϕ494×1 700	ϕ349×3 000
工作角 α_ρ/(°)	20	20	20
圆角半径 r_ρ/mm	10	25	15
压下量 H_ρ/mm	6	28	7
旋压温度/℃	350	350~400	350~400

ϕ540±0.2 mm×8 mm×1 500 mm 薄壁筒体热旋的总减薄厚度为 19 mm，分四道次成形，道次变薄率约为 25%，进给比控制在 1.0~3.0 mm/r 之间，主要工艺参数见表 5.7-36。ϕ534 mm×20 mm×2 000 mm 厚壁筒体热旋过程稳定性不及薄壁筒体，厚壁工件的旋压减薄量见表 5.7-37。

表 5.7-37 主要工艺参数

道次	减薄率 /%	间隙 /mm	转速 /r·min⁻¹	进给比 /mm·r⁻¹	旋轮参数			温度 /℃
					α_ρ/(°)	r_ρ/mm	H_ρ/mm	
1	26	20	45	1.3	20~25	5~7	5~7	300~350
2	28	14	45	1.5	20~25	5~7	5~7	320~300
3	28	10	45	3.0	20~25	5~7	5~7	250~200
4	25	8	45	2.5	20~25	5~7	5~7	~150

表 5.7-37 厚壁坯料热旋的减薄量

道次	1	2	3	4	5	6	7	8
减薄量/mm	5	6	7	7	8	8	9	10
间隙/mm	75	69	62	55	47	39	30	20
变薄率/%	6.2	8.0	10	11.3	14.5	17	23	33

(4) 5A02 管材旋压

5A02 室温旋压性能优于 5A06，采用离心铸坯进行旋压管材，铸坯尺寸为 ϕ520 mm×80 mm×970 mm。5A02 铝合金筒体离心铸坯变薄旋压成形工艺过程如下：

离心铸坯机加旋压坯料 ϕ506 mm×58 mm×960 mm，经两道次热旋开坯后再进行四道次温旋至成品。变薄旋压温度 300~350℃之间。开坯旋压改善了铸坯组织，成品温旋细化了晶粒，变薄旋压工艺参数见表 5.7-38。

表 5.7-38 5A02 合金变薄旋压工艺参数

道次	变薄率/%	间隙/mm	温度/℃	进给比/mm·r⁻¹	备注
1	22	45	350	1.0	开坯旋压
2	33	30	300	1.0	开坯旋压
3	26	22	250	1.0	温旋
4	27	16	200	1.0	温旋
5	31	11	150	1.0	温旋
6	27	8	100	1.0	温旋

(5) 紫铜长管旋压

材料为紫铜（T_2），其强度低，塑性好，很适宜变薄旋压，管材规格，坯料及芯模尺寸见 5.7-39。

长管变薄旋压需长芯模，长芯模的整体加工困难，采用螺纹连接假芯模的方法，可解决长芯模整体加工的困难。细长紫铜管变薄旋压时，芯模直径的设计参考产品内径公差下限。坯料的内径一般比芯模中限大 0.50~1.0 mm。

表 5.7-39 长铜管变薄旋压试验条件 mm

规格	1	2	3	4
产品	$\phi 99^{+0.1}_{0}\times 2\times 2\,500$	ϕ123 ±0.15×1.6 ×2 500	ϕ156 ±0.2×1.8 ×2 500	ϕ236 ±0.2×3 ×2 500
坯料	$\phi 106^{+0.1}_{0}\times 5\times 1\,200$	$\phi 131^{+0.15}_{0}\times 5\times 900$	$\phi 165^{+0.2}_{0}\times 6\times 1\,000$	$\phi 247^{+0.25}_{0}\times 8\times 1\,000$
芯模	$\phi 95^{0}_{-0.1}\times 4\,000$	$\phi 120^{0}_{-0.15}\times 4\,000$	$\phi 151.9^{0}_{-0.2}\times 4\,000$	$\phi 230^{0}_{-0.25}\times 4\,000$



紫铜有良好的可旋性，多道次累计变薄率大于80%。旋压道次变薄率在30%～40%范围，工件尺寸精度和表面质量好。在道次变薄率偏大时，堆积高度的增加引起工件表面起皮；扩径量和回弹量增加，降低其尺寸精度。

随着进给比的增加，工件的堆积高度、壁厚回弹量递增；其扩径量相应减小，进给比约为1.0 mm/r，扩径量较小。

紫铜旋压采用工作角 $\alpha_\rho=15°\sim20°$，圆角半径 $r_\rho=8\sim10$ mm的旋轮，进给比为 $f=0.5\sim1.5$ mm/r，道次变薄率选择 $\Psi_t=30\%\sim35\%$ 合适。

三道次旋压不同进给比的旋压工件尺寸精度见表5.7-40，工件内径随着进给比的降低而相应增加。

不同道次和不同旋轮结构参数旋压的工件精度见表5.7-41，三道次旋压变形量适中，工件的尺寸精度优于两道次的结果。

表5.7-40 不同进给比组合对工件尺寸精度的影响

工艺	进给比/mm·r⁻¹			内径/mm	外径/mm	椭圆/mm	旋轮
1	1.0	1.0	0.5	119.78	123.40	0.16	$\alpha_\rho 15° r_\rho 8$ mm $H_\rho 4$ mm（台阶旋轮）
2	1.0	0.5	0.5	119.88	123.60	0.05	
3	0.7	0.5	0.5	119.91	123.48	0.07	
4	1.0	1.0	0.5	119.72	123.35	0.14	$\alpha_\rho 20°\ r_\rho 8$ mm（双锥旋轮）
5	0.8	0.6	0.6	119.84	123.25	0.16	
6	0.5	0.5	0.5	119.95	123.12	0.20	

长铜管旋压工艺参数见表5.7-42。前两道次以减壁为主，进给量不大；第三道次以收径提高尺寸精度为主，进给量较大。第四道次以控制产品质量，易于脱模为宜，进给量适中。

表5.7-41 不同道次和不同旋轮参数对尺寸精度的影响

道次	变薄率/%	内径/mm	椭圆度/mm	壁厚/mm	壁差/mm	外径/mm	表面	旋轮参数
2	41～48	152.6	0.40	2.05	0.10	157.01	起皮	$\alpha_\rho 15 r_\rho 8 H_\rho 4$
3	31～34～33	151.8	0.20	1.95	0.10	155.70	较光	台阶旋轮
2	41～49	151.9	0.13	1.80	0.20	155.39	纹迹	$\alpha_\rho 20 r_\rho 8$
3	31～34～33	151.5	0.10	1.80	0.07	155.20	纹迹	双锥旋轮

表5.7-42 ϕ152 mm紫铜管变薄旋压工艺参数

道次	转速/r·min⁻¹	进给量/mm·min⁻¹	道次变薄率/%	累计变薄率/%	减壁量/mm	壁厚/mm
1	65	70	25	25	1.50	4.5
2	65	80	25	44	1.10	3.4
3	65	90	30	60	1.00	2.4
4	65	70	30	70	0.70	1.7

（6）铜镍合金旋压

铜镍合金耐蚀性良好，可离心铸坯变薄旋压铜镍合金管材，其工艺过程为：

离心铸坯—均匀化处理—开坯旋压—中间退火—成品旋压—成品退火。

铜镍合金加入适量铁可提高力学性能和耐蚀性，其含量控制1.5%左右，耐海水腐蚀效果显著。铜与镍无限固溶形成连续固溶体，晶格结构为面心立方，具有优良可旋性，累计变薄率可达90%，成形效果很好。

B10是含镍10%的白铜合金，其离心浇铸时，熔炼温度1 420～1 520℃，浇铸温度1 380～1 420℃。离心机转速在600～800 r/s之间，可浇铸如下规格空心铸锭作为旋压坯料，见表5.7-43。

坯料均匀化处理可消除铸锭枝状组织，减少偏析。均匀化温度为1 000℃×4 h，旋压性能较好。旋压累计变薄率为80%晶粒破碎充分，经650～700℃再结晶退火，可获得较细晶粒。管材力学性能为：$\sigma_b>320$ MPa，$\sigma_{0.2}>160$ MPa，$\delta_5>40\%$，综合性能良好。

表5.7-43 B10合金旋压坯料的铸锭规格

牌号	1	2	3	4	5
规格/mm	ϕ200×33×520	ϕ247×39×520	ϕ274×40×520	ϕ323×41×520	ϕ384×44×520
转速/r·s⁻¹	800	740	700	650	600

9.3 锥形件变薄旋压实例

（1）2219合金冷旋

2219属于Al－Cu－Mn系可热处理强化铝合金，也是高强度、耐热、可焊铝合金，具有良好的低温和高温力学性能、断裂韧性以及抗应力腐蚀性能。

2219锥形件选择五道次旋压成形，前三道次旋后进行退火软化，第四道次旋后经淬火处理，第五道次进行成品旋

压，形变热处理工艺可提高旋压锥形件的强度。

旋压坯料尺寸为 ϕ570 mm×12 mm。退火温度为360℃，保温4 h炉冷；淬火温度为535℃保温10 min，淬火转移15 s。2219合金锥形件旋压工艺参数见表5.7-44。

表5.7-44 旋压工艺参数

道次	道次变薄率 /%	半锥角 α/(°)	累计变薄率 /%	进给比 /mm·r^{-1}	间隙 /mm	壁厚 /mm	旋轮安装角 β/(°)	旋轮圆角半径 r_ρ/mm
1	29.3	45	29.3	0.54	8.0	8.25	-12	12
2	29.3	30	50	0.70	5.2	6.0	+3	12
3	31.1	20	66	0.54	3.0	4.10	-7	12
4	29.3	14	75	0.75	2.0	3.05	-1	12
5	21.1	11	81	0.60	1.2	2.30	-7	6

表5.7-45 锥形件尺寸精度 mm

道次	壁厚偏差（母线）	壁厚偏差（周向）	母线直线度	端口间隙	壁厚回弹
1	0.20~0.35	0.10~0.25	0.75	2.25	0.40
2	0.10~0.14	0.10~0.20	0.65	2.75	0.50
3	0.10~0.20	0.10~0.20	0.40	2.25	0.90
4	0.10~0.20	0.10~0.20	0.40	2.75	0.70
5	0.05~0.10	0.05~0.15	0.50	2.75	0.60

旋压工件精度见表5.7-45，壁厚偏差≤0.35 mm，母线不直度≤0.75 mm，壁厚回弹≤0.90 mm，表面粗糙度 R_a = 3.2 μm。

2219铝合金锥形件属大直径锥形件，采用单旋轮旋压成形，因旋压力不足，锥形件尺寸精度不及双旋轮旋压精度高。

(2) 5A06热旋

5A06铝合金属热处理不强化变形铝合金，冷旋压性能较差。旋压温度为350~400℃，可四道次旋压成形。锥形件要求径向跳动和椭圆度小于0.20 mm。产品半锥角 α = 10°，壁厚 t = 5 mm，大径端直径为 ϕ250 mm。旋压坯料尺寸为 ϕ260 mm×32 mm，热变形累计变薄率为82%，旋压工艺参数见表5.7-46。

表5.7-46 旋压工艺参数

道次	半锥角 α/(°)	道次变薄率/%	累计变薄率/%	间隙 /mm	回弹量 /mm	进给比 /mm·r^{-1}
1	45	29.3	29.3	21	0.1~1.0	0.20
2	28	33.8	53.2	14	0.5~1.0	0.30
3	18	34.1	69.2	9.0	0.5~1.0	0.40
4	10	42.4	82.2	5.0	~0.5	0.40

5A06合金室温剪切旋压时，因 Mg_2Al_3 相的影响，应变强化明显，累计变薄率约为35%易出现裂纹。旋压温度为350~400℃时，Mg_2Al_3 相以溶解为主，合金塑性较好，利于锥体成形。

编写：赵云豪（北京有色金属总院）



第 6 篇

特 种 锻 造

主 编 王高潮

编 写 王高潮 张质良 吴家贤
黎俊初 王家宣 常 春

审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会



第 1 章 挤　压

挤压是金属坯料在模具内通过压力机强大的压力和一定速度作用下，迫使金属从模口挤出，从而获得所需形状、尺寸并具有一定力学性能的挤压制品。

挤压成形可在专用挤压机上进行，也可在一般通用压力机、液压机上进行。挤压温度范围可以常温、中温和高温进行。

（1）挤压加工优点

1）提高金属变形能力。金属在挤压过程中由于在强烈的三向压应力状态，可充分发挥其塑性获得大的变形量。例如，纯铝挤压时挤压比可达 500，铜的挤压比可达 400，钢的挤压比可达 40 ~ 50。

2）挤压制品综合质量高。挤压变形可以改善金属材料组织，提高其力学性能。

3）产品范围广。挤压加工不仅可以生产断面形状简单的零件如管、棒及线材，而且可以生产断面形状非常复杂的零件、深孔薄壁件及实心零件和型材、在长度方向变化的变断面型材。挤压制品尺寸范围也很广，从断面外接直径达 500 ~ 1 000 mm 的超大型制品到断面极小的精密零件。

4）生产灵活性大。挤压加工具有很大灵活性。只需更换模具就可在同一台设备上生产出形状、尺寸规格和品种不同的制品。且更换模具操作简单方便、费时少、效率高。

5）工艺流程简单，设备投资少。

（2）挤压加工缺点

虽然挤压加工具有上述许多优点，但由于其变形方式及设备结构的特点，也存在如下缺点。

1）挤压力高。由于挤压时坯料处于近似封闭的三向压应力状态，模具承受很高的压力作用。如钢的冷挤压力高达 2 500 ~ 3 000 MPa。热挤压时还要承受高温、高摩擦作用，模具与挤压筒工作条件恶劣、耗损大因而使用寿命低。

2）挤压制品组织性能不均。挤压时由于金属流动不均，使挤压制品表层与中心、尾部与头部组织不均匀。特别是锻铝 2A20、2A70 等挤压制品，热处理后表面晶粒粗大形成粗晶环，严重影响制品使用性能。

3）生产效率低。一般挤压生产方法均不能实现连续生产，挤压速度远远低于轧制速度，且挤压废料损失大，造成生产效率低。

（3）挤压方法分类及应用

1）按坯料温度不同分类

① 冷挤压。该方法是在室温条件下对坯料进行挤压，具有高产低消耗以及精度高、表面光洁、内部力学性能高等优点，广泛应用于汽车、机械、仪表、轻工、宇航、船舶、军工等部门。当然冷挤压也存在一定缺点，变形时单位挤压力高，模具受力大，设备吨位高等。但是随着科学技术的发展，冷挤压技术将得到更广泛的应用。

② 温挤压。该方法是在冷挤压技术基础上发展起来的精密塑性成形新工艺。它的变形温度在室温以上完全再结晶温度以下温度范围内。温挤压不仅具有冷挤压成形优点，而且也避免了冷挤压和热挤压各自的缺点。如温挤压完全继承了冷挤压成形生产效率高、节约原材料、改善产品质量、比冷挤压变形抗力低、成形性好等优点，同时避免了热挤压变形能耗大、易产生过热、过烧氧化、吸气脱碳、加工余量大、劳动条件差、产品质量不高等缺点。而且温挤压不需冷挤压前软化热处理、磷化、皂化等辅助工序，易实现连续生产、自动化生产、设备吨位小，是一种极有发展潜力的精密成形制造技术，现已广泛应用于汽车、机械、轴承、电器军工等工业部门。

③ 热挤压。该方法是将坯料加热到再结晶温度以上、固相线以下温度范围，使变形材料的变形抗力大大减低、塑性提高，因此可以成形有色金属及其合金、碳钢、合金钢、不锈耐热钢等。但由于热挤压加热时氧化脱碳、过热过烧等，产品质量较差、模具寿命较低。目前对多品种小批量复杂断面零件、低塑性合金，只需更换模具即可生产合格产品，得到广泛应用。

2）根据挤压时金属流动方向与凸模运动方向间的关系，通常将挤压方法分为：

① 正挤压。正挤压挤压时金属流动方向与凸模运动方向相一致，分为实心件正挤压（图 6.1-1a）和空心件正挤压（图 6.1-1b）。正挤压可以制造各种断面形状的实心件和空心件、不对称的等截面挤压件及型材。

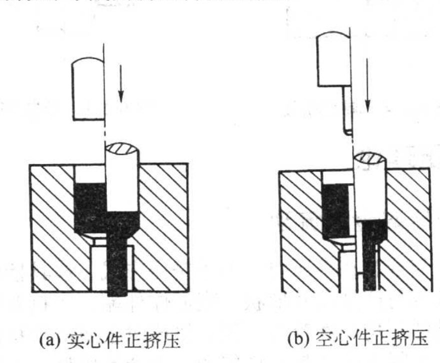


图 6.1-1　正挤压

② 反挤压　反挤压挤压时金属流动方向与凸模运动方向相反，如图 6.1-2 所示。反挤压可以制造各种断面的杯形件。

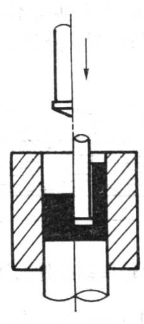


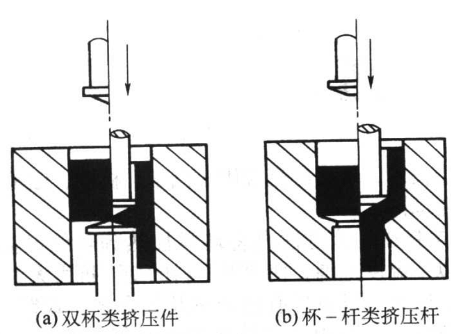
图 6.1-2　反挤压

③ 复合挤压。复合挤压挤压时，坯料一部分金属流动方向与凸模运动方向相同，而一部分金属流动方向与凸模运动方向相反，如图 6.1-3 所示。复合挤压可以制造双坯类零件，也可制造杯—杆类零件和杆—杆类零件。

④ 减径挤压。减径挤压是一种变形程度小于 30% 的正挤压法，如图 6.1-4 所示。减径挤压主要用于制造直径部分相差不大的阶梯轴类零件以及精整工序。

⑤ 径向挤压。径向挤压挤压时金属流动方向与凸模运动方向垂直，如图 6.1-5 所示。径向挤压可分为离心向外流动和向心向内流动两种，主要用于制造齿轮、十字轴等零件。





(a) 双杯类挤压件　(b) 杯－杆类挤压杆

图 6.1-3 复合挤压

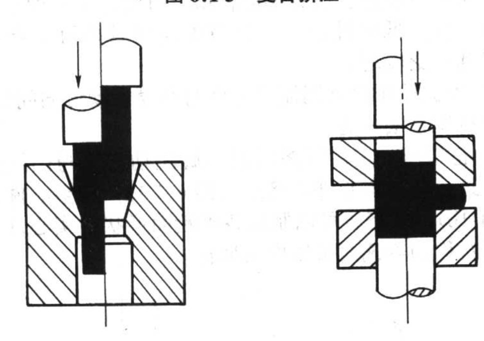


图 6.1-4 减径挤压　**图 6.1-5 径向挤压**

1 挤压理论

1.1 挤压时金属流动

金属与合金在挤压时，由于挤压方式、模具接触表面的摩擦、模具与产品尺寸形状、变形体外端、坏料温度与内部组织性能的不均匀性等的不同，挤压时金属流动特性是各不相同的，实际上变形是不均匀的，对产品质量、变形力等都有很大影响。研究金属流动，目前广泛应用的是坐标网格法、微观组织与性能法、密栅云纹法、光学分析法、光塑性和激光全息法等。

(1) 正挤压实心件金属流动

如图 6.1-6 所示是正挤压实心件时坐标网变化情况。由图可以对金属流动情况作如下分析。

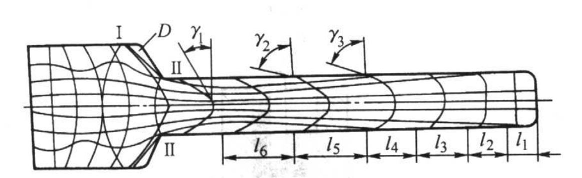


图 6.1-6 正挤压实心件的网格变化情况

1) 横向坐标线在出口处发生较大弯曲，且中间部分弯曲更剧烈，这是因为凹模与被挤压毛坯表面之间存在接触摩擦，使金属在流动时外层滞后于中层。被挤毛坯的端部横向坐标线弯曲不大，这是由于该部分金属原来就处在凹模出口附近，挤压时迅速向外挤出，受摩擦影响较小。横向坐标线的间距从挤出部分端部开始是逐渐增加的，即 $l_3 > l_2 > l_1$，这说明挤出金属的纵向拉伸变形愈来愈大；而当达到某定值 l_5 时，间距 l_6 不再变化，表明此时的变形已处于稳定状态。

2) 纵向坐标线挤压后也发生较大的弯曲。如果把开始向内倾斜的点连成Ⅰ－Ⅰ线，把开始向外倾斜的点连成Ⅱ－Ⅱ线。Ⅰ－Ⅰ线与Ⅱ－Ⅱ线之间所构成的区域为剧烈变形区。Ⅰ－Ⅰ线以左或Ⅱ－Ⅱ线以右坐标线基本上不变化，说明在这些区域内金属不发生塑性变形，只作刚性平移。

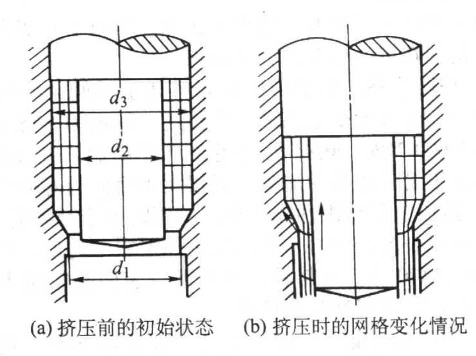
3) 正方形网格经过出口以后，变成了平行四边形，这说明金属除发生拉伸变形外，还有剪切变形。愈接近外层，剪切角愈大，即 $\gamma_2 > \gamma_3$，这是由于外层金属受到摩擦阻力的影响较大，使内外层的金属流动存在较大差异的缘故。刚开始挤出端部剪切角较小，以后逐渐增大，即 $\gamma_2 > \gamma_1$，这是由于刚开始挤压时，受摩擦影响较小的缘故。当进入稳定变形状态以后，相应处的剪切角保持不变。

4) 凹模出口转角 D 处，在挤压过程中形成不流动的“死区”。“死区”的大小受摩擦阻力、凹模形状与尺寸等因素的影响，当摩擦阻力愈大、凹模锥角愈大时，则“死区”也愈大。

由上述分析可以看出，正挤压实心件的变形特点是：金属进入Ⅰ－Ⅰ至Ⅱ－Ⅱ线之间的区域时才发生变形，此区称为剧烈变形区。进入此区以前或离开此区以后，金属几乎不变形，仅做刚性平移。在变形区内，金属的流动时不均匀的，中心层流动快，外层流动慢；而当进入稳定变形阶段以后，不均匀变形的程度是相同的。在凹模出口转角处会产生程度不同的金属“死区”。

(2) 正挤压空心件的金属流动情况

正挤压空心件的坐标网格变化情况见图 6.1-7。毛坯除了受凹模工作表面的接触摩擦影响外，还受到芯棒表面接触摩擦的影响，因而毛坯上的横向坐标线向后弯曲，不再有产生超前流动的中心区域，这说明正挤压空心件的金属流动比正挤压实心件均匀一些。在进入稳定流动时，剧烈变形区也是集中在凹模锥孔附近高度很小的范围内，金属在进入变形区以前或离开变形区以后，几乎不发生塑性变形，仅做刚性平移。



(a) 挤压前的初始状态　(b) 挤压时的网格变化情况

图 6.1-7 正挤压空心件的金属流动情况

(3) 反挤压杯形件的金属流动情况

用实心毛坯反挤压杯形件时，挤压变形过程的坐标网格变化情况见图 6.1-8。图 6.1-8b 表示毛坯高径比大于 1 进入稳定挤压状态时的网格变化情况。此时可将毛坯内部的变形情况分为三个区域：Ⅰ区为金属“死区”，它紧贴着凸模端表面，呈倒锥形，该锥形大小随凸模端表面与毛坯间的摩擦阻力大小而变化。Ⅱ区为剧烈变形区，毛坯金属在此区域内产生剧烈流动，该区的轴向范围大约为 $(0.1 \sim 0.2)\ d_1$（d_1 为反挤压凸模直径）。当凸模下行到毛坯底部尺寸仍大于此界限尺寸时，仍为稳定变形状态，金属流动局限于Ⅱ区内，Ⅱ区以下即紧贴凹模腔底部的一部分金属保持原状，不产生塑性变形。当凸模再继续下行到毛坯残余厚度小于此界限尺寸时，在此残余厚度内的全部金属材料皆产生流动，成为图 6.1-8c 所示的非稳定变形状态，图中 D 表示金属“死区”。Ⅲ区为刚性平移区，剧烈变形区的金属流动至形成杯壁后就不再变形，而是以刚性平移的方式向上运动，该运动一直延续到凸模停止工作时为止。

(4) 复合挤压时的金属流动情况



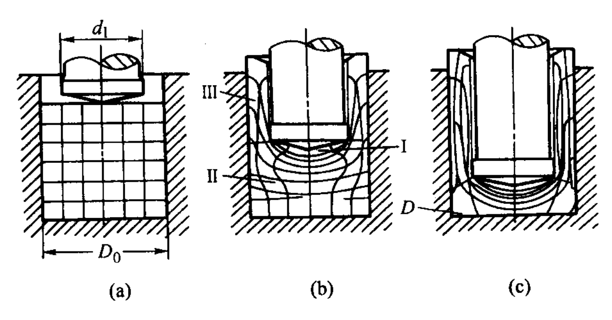


图 6.1-8 杯形件反挤压的流动情况

复合挤压时，坐标网格的变化情况如图 6.1-9 所示。在变形区内，有向不同出口流动的区域边界，即分流面。由于受模具结构、零件形状及外摩擦等因素的影响，分流面常常不能用简单的方法来决定。图 6.1-9a 为上下对称形状的实心件的复合挤压（杆—杆型复合挤压）；图 6.1-9b 为杯—杯型复合挤压；图 6.1-9c 为杯—杆型复合挤压。图中 D 表示金属"死区"。

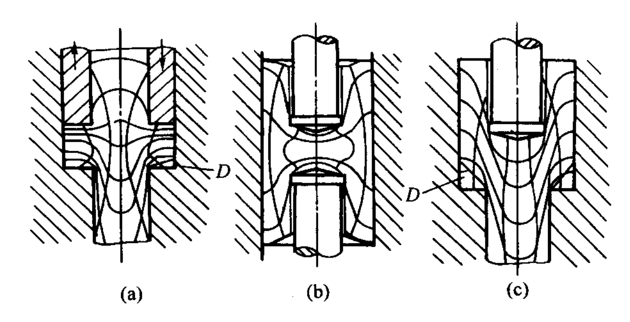


图 6.1-9 复合挤压时的金属流动情况

1.2 挤压时的附加应力

金属在挤压时除变形金属内部存在着与外力相应的基本应力以外，还由于变形体内各层的不均匀变形受到变形体整体性的限制，而引起变形金属内部各部分自相平衡的应力，称为附加应力。图 6.1-10 为正挤压时产生的附加应力示意图。正挤压时中心部分金属由于没有外摩擦影响流动速度大于外层流动速度，由于内外层金属是一个整体，外层金属附加应力为拉应力；与此相反，中心部分金属的附加应力是压应力。外层产生的不利于塑性变形的附加拉应力达到一定数值时，使挤压件表面产生横向开裂。当挤压过程完成后，引起变形的作用力取消后，附加应力并不消失，而是残留在变形体内部成为残余应力。这种附加应力和残余应力不仅影响挤压件使用寿命，引起挤压件尺寸、形状变化如弯曲、歪扭等，而且也严重影响挤压件的耐腐蚀性。因此为去除残余应力，挤压后有时需进行消除残余应力的退火处理。

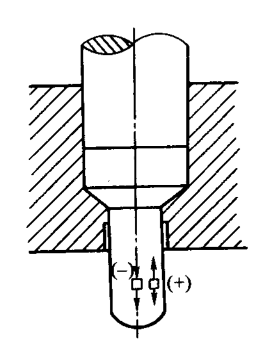


图 6.1-10 正挤压时产生的附加应力

1.3 挤压时的外摩擦

挤压变形时，变形金属沿模具表面产生相对滑动或具有产生相对滑动趋势时，沿接触表面便产生阻碍滑动的阻力称摩擦力。由于挤压时单位压力高达 500 ~ 2 500 MPa，且在温、热挤压时高温作用和新生金属表面不断变化，故挤压变形的滑动摩擦与机器中的滑动摩擦有很大差别。

挤压时由于外摩擦存在，不仅使变形状态和应力状态不均匀，变形抗力增加，模具寿命降低，而且产品质量受到很大影响。因此在挤压成形过程中，为了减少摩擦力应添加润滑剂。根据润滑剂的隔离层厚度和存在特征，可将挤压时的摩擦分为如下三种类型。

1）液体摩擦。在模具与变形金属的接触表面存在较厚的润滑层，其厚度大于分子距离 1 000 ~ 10 000 倍，完全被液体润滑后分开，称为液体摩擦。

2）边界摩擦。在模具与变形金属的接触表面之间，仅存在润滑剂吸附层油层，约为 0.1 ~ 0.01 μm。由于吸附层分子呈定向排列，润滑剂的吸附层不具有液体润滑剂的基本物理性质——流动性，而相当固体物质，因此能承受较大压力，具有较低的层间剪切阻力。在实际挤压成形过程中，达到完全的吸附润滑摩擦是难以找到的。吸附层一旦部分被破坏便形成干摩擦。

3）干摩擦。在模具与变形金属的接触表面之间，没有润滑剂薄膜存在，摩擦表面处于直接接触状态的摩擦称为干摩擦。实际上，真正的干摩擦只能在真空中实现，在挤压成形中绝对的干摩擦是不存在的，也是不希望的。如果真的出现干摩擦，接触表面必产生粘附，产生严重表面擦伤。挤压时，实际上大多是上述几种摩擦的混合情况。

1.4 挤压力的计算

挤压力是工艺与模具设计的基础和挤压设备吨位选择的依据。

确定挤压力包括两项内容：决定在凸模上所承受的单位挤压力（凸模单位面积上承受的压力），目前冷挤压模具钢所能承受的许用单位挤压力为 2 500 MPa（条件良好时可达 3 000 MPa），决定此工序变形所需的总吨位。将凸模上承受的单位挤压力乘凸模的水平投影面积，即可算出变形所需要的总挤压力。

挤压力的确定方法很多，有图算法、公式计算法等。用图算法求解变形力，在实际生产中甚为方便，既避免了繁杂的计算，又具有足够的准确性。

1.4.1 冷挤压力的计算

（1）图算法确定挤压力

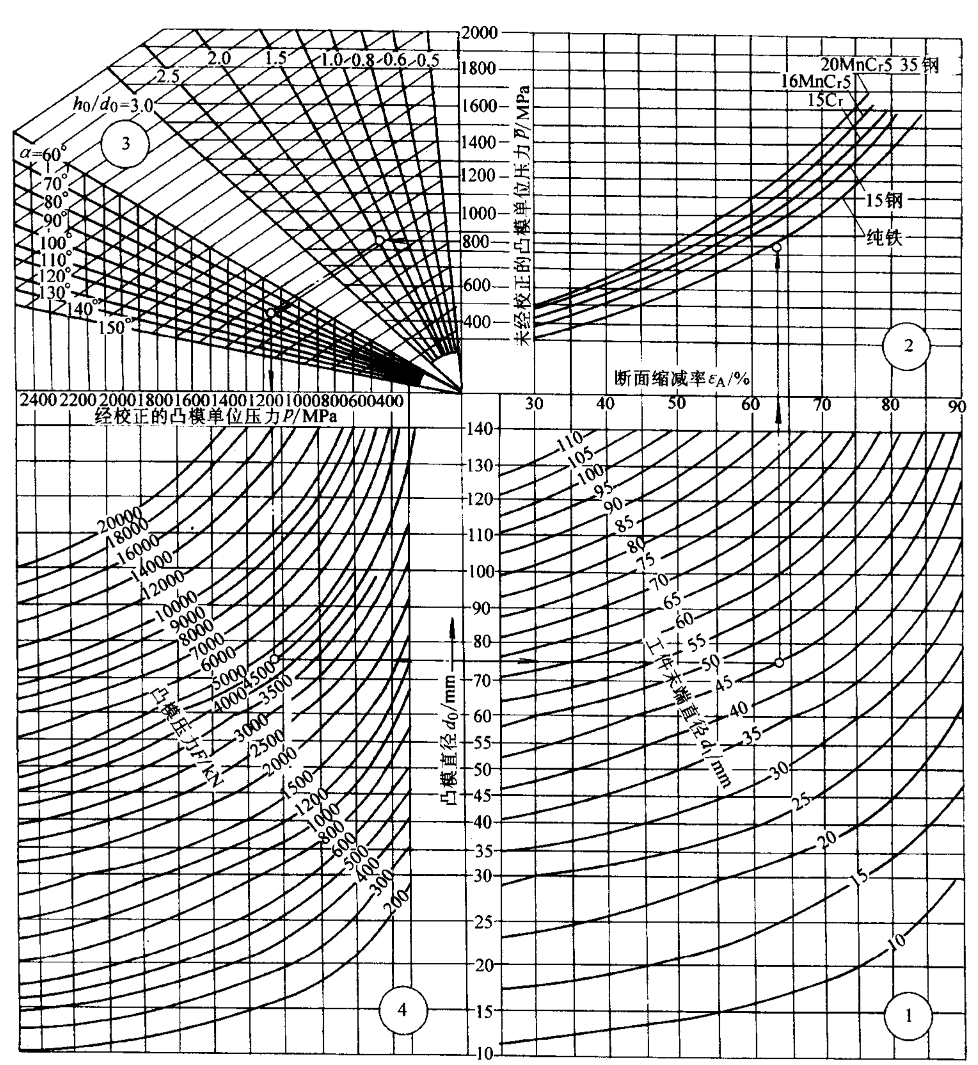
1）黑色金属挤压力的图算法。图 6.1-11、图 6.1-12 和图 6.1-13 为正挤实心件、正挤空心件及反挤压的挤压力的计算图表。此图表以影响挤压力的主要因素——变形程度及挤压材料性能为计算基础，并考虑了其他因素的影响。在正挤压时，考虑了毛坯的长径比 h_0/d_0 及凹模锥角 α 的影响，在反挤压时考虑了毛坯长径比 h_0/d_0 的影响。

用这组图表计算挤压力时，毛坯应经软化退火，并在挤压前进行磷化、润滑处理。它的计算方法见图上虚线所示，现分别举例说明如下。

① 正挤实心件的图算法（图 6.1-11）

已知：

毛坯直径（或凸模直径）	$d_0 = 75$ mm
挤压后直径	$d_1 = 45$ mm
毛坯长度	$h_0 = 110$ mm
凹模锥角	$\alpha = 90°$
毛坯材料	纯铁



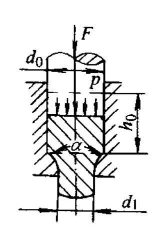


图 6.1-11　黑色金属正挤压实心件挤压力计算图

求解步骤如下。

a）根据相应的 d_0 及 d_1，查图①得断面缩减率：ε_A = 64%。

b）根据 ε_A = 64%及毛坯材料查图②，求得未经修正的单位挤压力：p = 850 MPa。

这个 p 相当于毛坯长径比 $h_0/d_0 = 1$，凹模锥角 $\alpha = 60°$ 时单位挤压力。

c）考虑到 $h_0/d_0 = 1.5$，$\alpha = 90°$，上述单位挤压力需要修正，因此可根据图③中相应的曲线，查得修正的单位挤压力：p = 1 050 MPa。

d）根据毛坯直径 d_0 和修正的单位挤压力 p，从图④中查得总挤压力：F = 4 600 kN。

② 正挤空心件的图算法（图 6.1-12）

已知：

毛坯外径（凸模直径）	d_0 = 95 mm
挤压后零件外径	d_1 = 85 mm
挤压后零件内径	d_2 = 80 mm
毛坯长度	h_0 = 50 mm
凹模锥角	α = 120°
毛坯材料	纯铁

求解步骤：

a）计算变形前毛坯横断面积 A_0 和变形后横断面积 A_1：

$$A_0 = \frac{\pi}{4}(d_0^2 - d_2^2) = \frac{\pi}{4}(95^2 - 80^2)\ \text{mm}^2 = 2\,060\ \text{mm}^2$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4}(d_1^2 - d_2^2) = \frac{\pi}{4}(85^2 - 80^2)\ \text{mm}^2 = 650\ \text{mm}^2$$

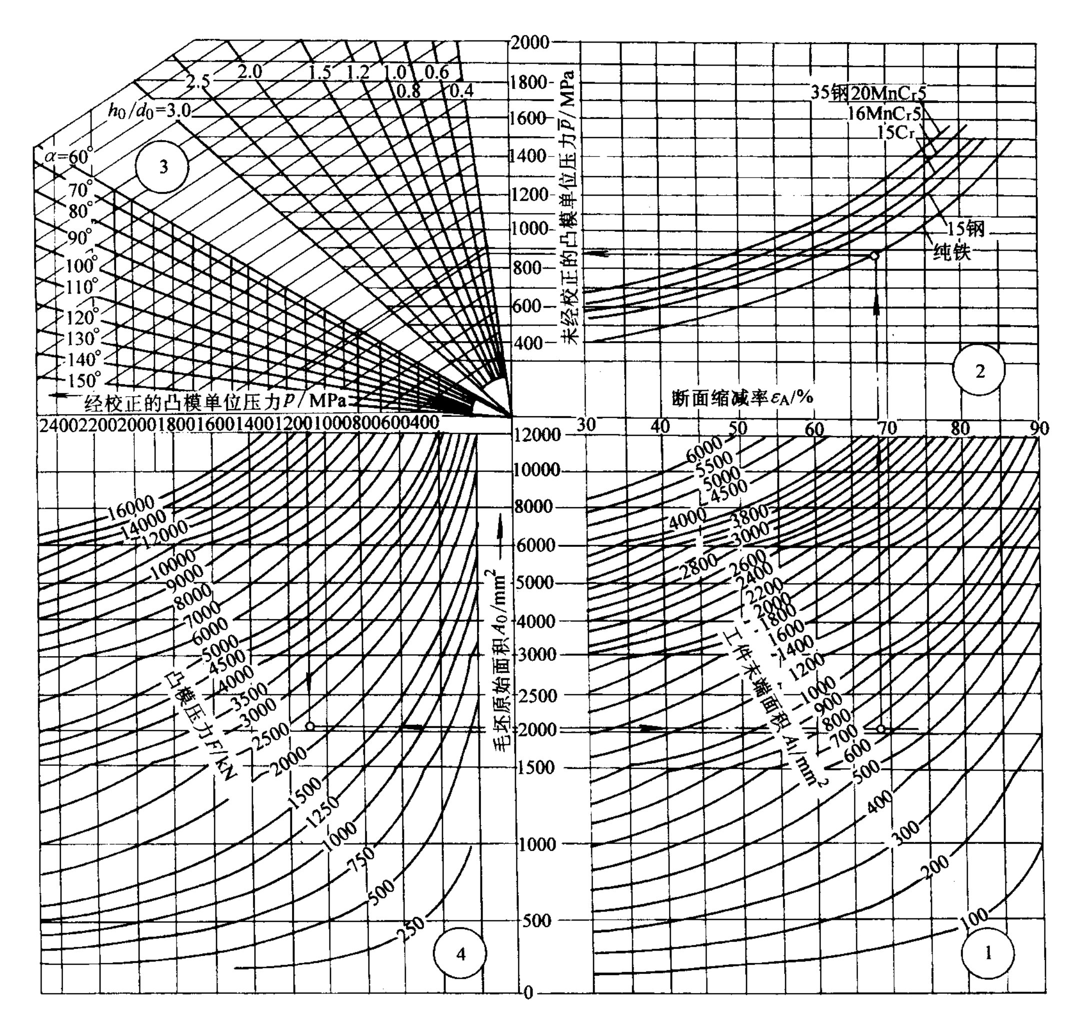
b）根据上述 A_0 和 A_1 数值，查图①得 ε_A = 69%。

c）根据 ε_A = 69%和毛坯材料，查图②得未经修正的单位挤压力：$\bar{p}$ = 890 MPa。

d）根据 h_0/d_0 = 0.53 及 α = 120°从图③查得经过修正的单位挤压力：p = 1 100 MPa。

e）根据毛坯变形前横断面积 A_0 和单位挤压力 p，查图





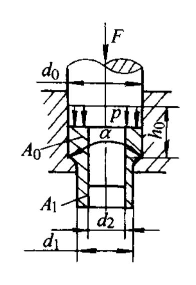


图 6.1-12　黑色金属正挤压空心件挤压力计算图

④得总挤压力：$F = 2\,250$ kN

③ 反挤压的图算法（图 6.1-13）

已知：

毛坯直径（或凹模直径）　$d_0 = 70$ mm

凸模直径　$d_1 = 58$ mm

毛坯长度　$h_0 = 35$ mm

毛坯材料　纯铁

求解步骤如下。

a）根据毛坯直径 d_0 和凸模直径 d_1，查图①求得断面缩减率：$\varepsilon_A = 69\%$。

b）根据 $\varepsilon_A = 69\%$ 和毛坯材料，查图②（上部曲线）得未经修正的单位挤压力：$\bar{p} = 1\,860$ MPa。同时根据 $\varepsilon_A = 69\%$ 和 $h_0/d_0 = 0.5$ 从图②（下部曲线）查得毛坯高度修正系统 $k = 0.94$。

c）未经修正的单位挤压力 $\bar{p}$ 经过图③的毛坯高度修正（上部曲线）和毛坯外径修正（下部曲线）查得修正的单位挤压力：$p = 1\,660$ MPa。

d）根据修正的单位挤压力 p 和凸模直径 d_1，查图④得总的挤压力：$F = 4\,400$ kN。

2）有色金属挤压力的图算法

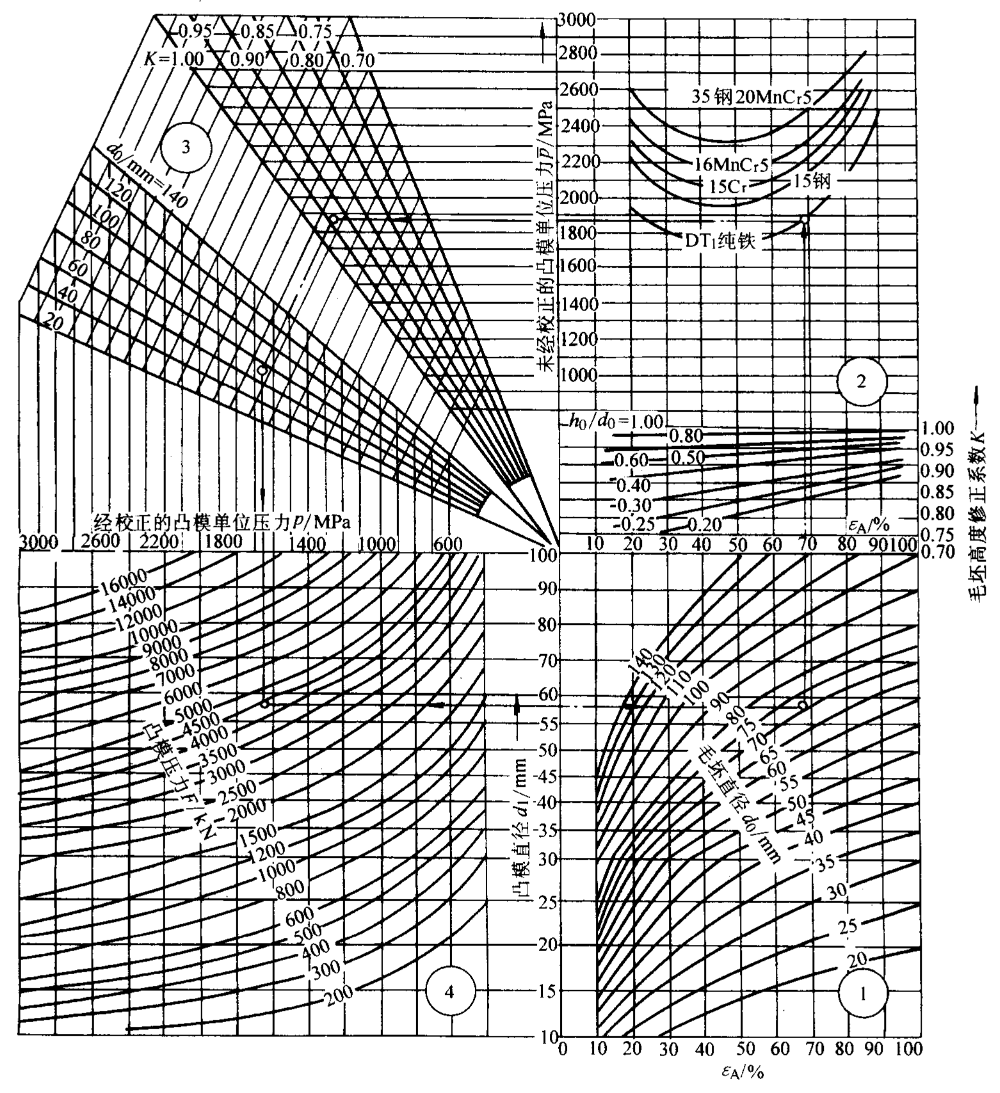
图 6.1-14、图 6.1-15 和图 6.1-16 分别为正挤实心件、正挤空心件和反挤压的单位挤压力 p 的计算图表。

冷挤压的总挤压力 F 可按下式计算

$$F = pA$$

式中，F 为总挤压力，N；p 为单位挤压力，MPa；A 为凸模横断面积，mm^2。

(2) 计算法确定挤压力



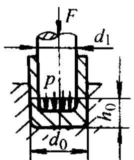


图 6.1-13 黑色金属反挤压挤压力计算图

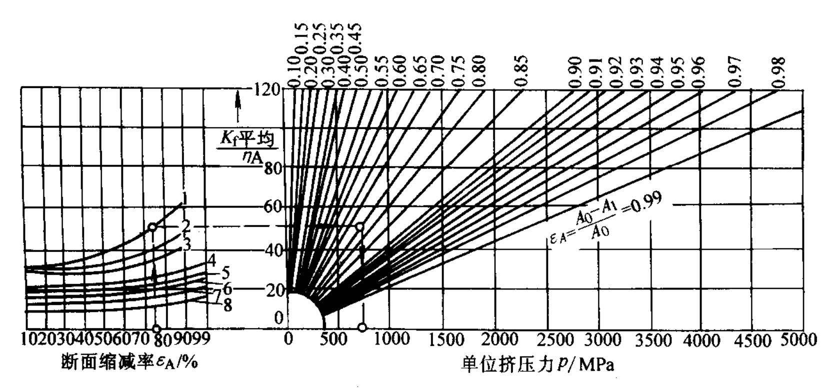


图 6.1-14 有色金属实心件正挤压单位挤压力计算图

计算公式很多，用下列公式求冷挤压的单位压力，计算结果比较接近实际。

1）正挤压实心件的单位挤压力 p（MPa）

$$p=2\sigma\left(\ln\frac{d_0}{d_1}+2\mu\frac{h_1}{d_1}\right)e^{\frac{2\mu h_0}{d_0}}$$

式中，σ 为挤压材料变形抗力，MPa，在图 6.1-17 中按对数

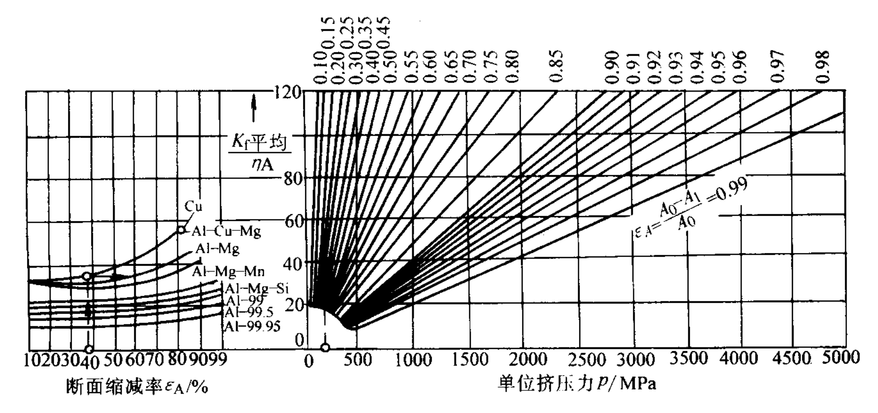


图 6.1-15 有色金属空心件正挤压单位挤压力计算图

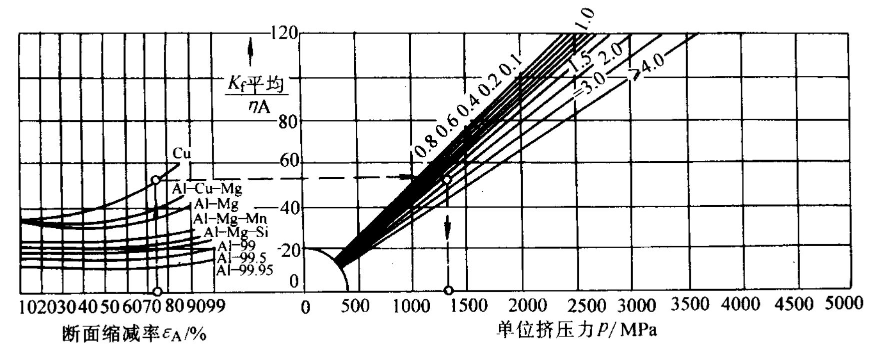


图 6.1-16 有色金属反挤压单位挤压力计算图

变形程度 φ 查得；d_0 为毛坯直径，mm；h_0 为毛坯高度，mm；d_1 为挤压后直径，mm；h_1 为凹模工作带高度，mm；μ 为摩擦系数（有润滑剂时可取 $\mu=0.1$）。

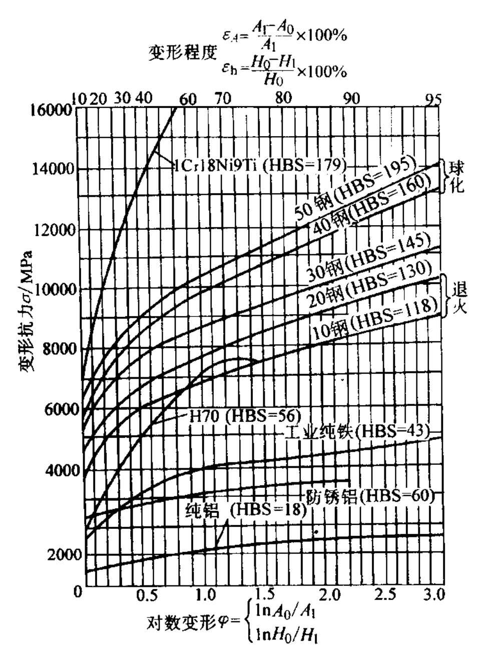


图 6.1-17 不同材料的变形抗力

2）反挤压的单位挤压力 p（MPa）

$$p=\sigma\left[\frac{d_0^2}{d_1^2}\ln\frac{d_0^2}{d_0^2-d_1^2}+(1+3\mu)\times\left(1+\ln\frac{d_0^2}{d_0^2-d_1^2}\right)\right]$$

式中，σ 为挤压材料变形抗力，MPa，在图 6.1-17 中查得；d_0 为毛坯直径，mm；d_1 为工件内径，mm；μ 为摩擦系数（有润滑剂时可取 $\mu=0.1$）。

3）复合挤压的单位挤压力根据试验结果可知，复合挤压的压力低于单向正挤压和单向反挤压的压力。

当复合挤压不限定某一方向尺寸时：

$$p_{复}=p_{正}\quad(p_{正}<p_{反})$$

$$p_{复}=p_{反}\quad(p_{反}<p_{正})$$

当复合挤压限定某方向尺寸时：

$$p_{复}=p_{反}\quad（正挤压限定尺寸）$$

$$p_{复}=p_{正}\quad（反挤压限定尺寸）$$

（3）镦粗变形力的计算

1）自由镦粗时变形力

$$F=A_0p=A_0\sigma\left(1+\frac{1}{3}\mu\frac{d}{H_1}\right)$$

式中，F 为总镦粗力，N；A_0 为工件镦粗后横断面积，mm²；p 自由镦粗的单位压力，MPa；σ 为变形终了时变形抗力，MPa，由 $\ln\frac{H_0}{H_1}$ 值查图 6.1-17；μ 为摩擦因数，见表 6.1-1；d 变形后的直径，mm；H_1 变形后的高度，mm。

表 6.1-1 镦粗时不同润滑剂的摩擦因数（钢对钢）

润滑剂	摩擦因数	润滑剂	摩擦因数
磷化处理＋皂化	0.06～0.08	MoS_2＋润滑油	0.07～0.08
石墨＋润滑油	0.08～0.10	矿物油	0.12～0.14

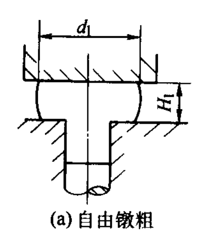
2）其他形式镦粗时变形力

$$F=AC\sigma_m$$

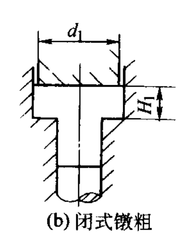
式中，F 为最大镦粗力，kN；A 为镦粗终了时的受压面积，mm²；C 为不同镦粗形式的系数，见图 6.1-18 及图 6.1-19；σ_m 为平均变形抗力，MPa；由 $\varphi_1=0$ 和 $\varphi_2=\ln\frac{H_0}{H_1}$（$H_0$ 为变形前镦粗部分的高度）查图 6.1-17，求得 σ_1 和 σ_2。

则 $$\sigma_m=\frac{1}{2}(\sigma_1+\sigma_2)$$



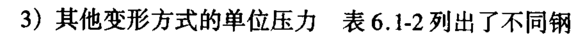


(a) 自由镦粗



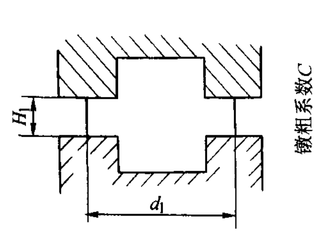
(b) 闭式镦粗

图 6.1-18 镦粗系数 C 值



$H_1>d_1$ $C\approx1.2$ $H_1>d_1$ $C\approx2.4$ $H_1\leqslant0.8d_1$

$C=1.5\sim1.7$ $H_1\leqslant0.8d_1$ $C\approx3\sim5$



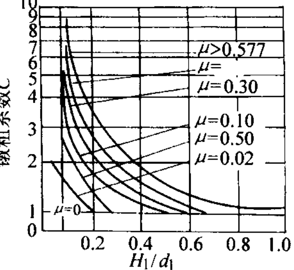


图 6.1-19 镦粗系数 C 值（μ 为摩擦因数）

3）其他变形方式的单位压力 表 6.1-2 列出了不同钢种、各种变形方式的单位压力，可作计算时参考。

表 6.1-2 不同钢种、各种变形方式的单位压力

变形方式	w（C）≤0.1%低碳钢		w（C）为0.1%～0.3%		w（C）为0.3%～0.5%	
			碳钢	渗碳钢	碳钢	低合金钢
	ε_A、ε_h/%	p/MPa	ε_A、ε_h/%	p/MPa	ε_A、ε_h/%	p/MPa
正挤压	50～80	1 400～2 000	50～70	1 600～2 500	40～60	2 000～2 500
反挤压	40～75	1 600～2 200	40～70	1 800～2 500	30～60	2 000～2 500
缩颈	25～30	900～1 100	24～28	1 000～1 300	23～28	1 150～1 500
自由镦粗	50～60	500～700	50～60	800～1 000	50～60	1 000～1 500
冷模锻	30～50	1 000～1 600	30～50	1 600～2 000	30～50	1 800～2 500
型腔挤压		2 000～2 500		2 000～2 500		2 200～2 500

注：1. $\varepsilon_A=\dfrac{A_0-A_1}{A_0}\times100\%$，$\varepsilon_h=\dfrac{H_0-H_1}{H_0}\times100\%$。

2. 变形程度大时单位压力取上限，反之取下限。

1.4.2 温挤压力的计算

温挤压与冷挤压一样，其挤压力和毛坯的钢种性能、变形程度、零件形状、模具形状以及润滑剂有关，此外，还与毛坯加热温度有很大关系。

（1）图算法确定挤压力

图 6.1-20 是钢的温挤压单位压力计算图。图上的曲线是在图中所示模具参数的条件下获得的，挤压前模具预热到 60～100℃，用油与石墨的混合剂作润滑，加工温度在 600℃以下者，毛坯作磷化处理，600℃以上者，毛坯不预先处理。

图中虚线上的箭头表明了查图的方法。例如：当加工温度 550℃挤压 35 钢时，可沿图中 550℃向上虚线交到 35 钢的曲线上，然后箭头向左标到正挤断面缩减率 80% 曲线上的一点，这一点在水平轴上的投影数据 1 900 MPa 就是 35 钢在 550℃作 80% 正挤压变形时的单位挤压力。如果反挤压，则箭头向右标去，同样可查到某一断面缩减率下的单位压力数据。决定了单位挤压力便可计算挤压力：

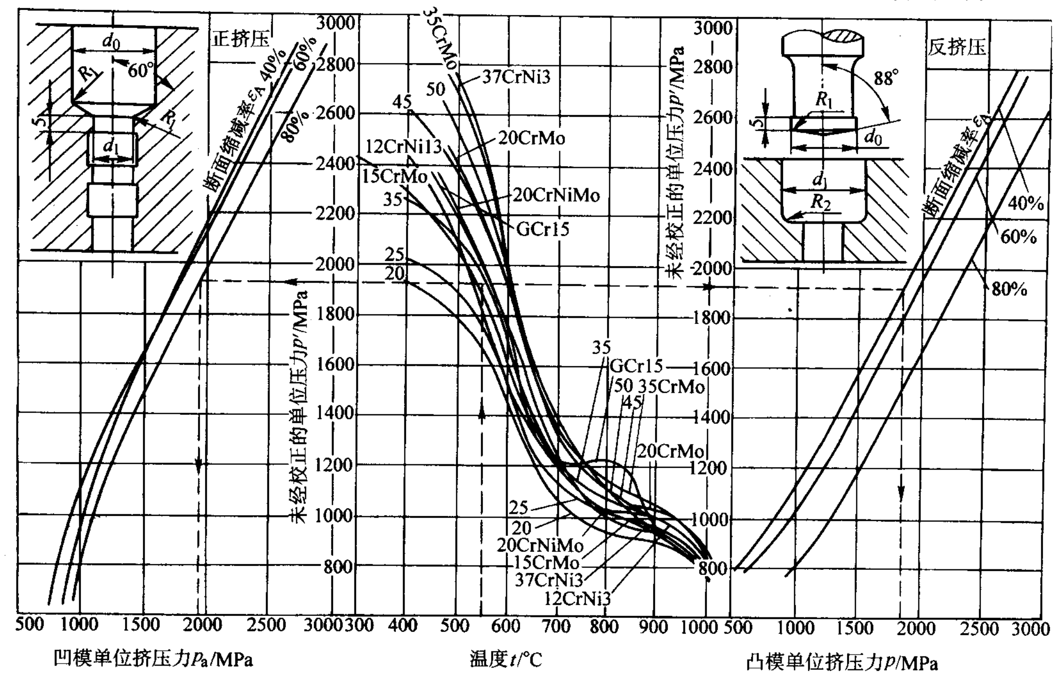


图 6.1-20 钢的温挤压单位压力计算图

正挤压时 $F=p_aA=\frac{\pi}{4}(d_0^2-d_1^2)p_a$

反挤压时 $F=pA=\frac{\pi}{4}d_0^2p$

式中符号均按图6.1-20中所示。

(2) 计算法确定挤压力

1) 理论公式计算。温挤时单位挤压力的计算公式，可据金属塑性变形区内的平衡微分方程式与屈服准则的方程联立求解获得。

其计算公式与冷挤压单位挤压力公式相同，但是公式中变形抗力及摩擦系数值按温挤变形温度进行选用。

2) 经验公式计算。前面两种单位挤压力的获得方法一是实验所得，二是理论推导所得，有时不能适应所有的生产实际情况。因此，可采用经验估算的公式法进行近似计算。

① 用元素含量的估算公式。对于在200～600℃反挤压时的凸模单位压力可按下列经验公式计算：

$$p=15.75(76C+1.3Ni-0.08Cr-0.1t+0.36\varepsilon_A+143)$$

式中，p 为凸模最大单位挤压力，MPa；C 为碳的质量分数,%；Ni为镍的质量分数,%；Cr为铬的质量分数,%；t 为毛坯加热温度,℃；ε_A 为变形程度，以断面缩减率表示,%。

由公式可知，材料的品种以元素的影响程度而列出。本公式适用于一般碳钢和低合金钢以及常用的奥氏体、铁素体和马氏体不锈钢，其计算与实际的误差在10%以内，对其他钢种使用该公式时，误差会增大。

② 拘束系数估算公式

正挤压时 $p_t=Cn\sigma_b$

式中，p_t 为凸模最大单位挤压力；C 为拘束系数；n 为考滤温挤变形时材料冷作硬化的硬化系数；σ_b 为在温挤温度时的材料抗拉强度。

反挤压时 $p_m=Cn\sigma_b$

式中，p_m 为相对毛坯断面积的单位挤压力。

由于此时毛坯断面积与凸模断面积不同，所以凸模上的单位挤压力

$$p_t=\frac{A_m}{A_t}p_m=Cn\sigma_b\frac{A_m}{A_t}$$

式中，A_m 为毛坯断面积；A_t 为凸模工作带断面积。

式中 σ_b 值，可查找有关资料在不同温度下的抗拉强度。

图6.1-21可用于查找钢在不同温度下的抗拉强度，但需已知其室温抗拉强度。图中曲线上所标数据为材料在室温时的抗拉强度。根据温挤的温度及室温抗拉强度，很容易在图中找到相应于该温挤温度时的抗拉强度。例如，室温时 σ_b 为600 MPa的材料，在600℃时的 σ_b 为240 MPa；在700℃时为150 MPa；在800℃时为110 MPa。

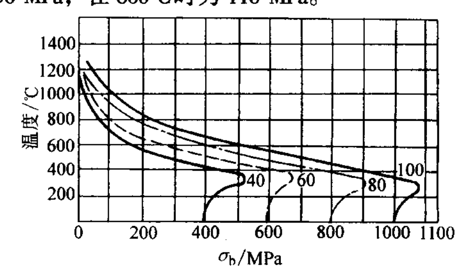


图6.1-21 钢随温度变化的抗拉强度 σ_b 图

式中的拘束系数和硬化系数列于表6.1-3。当温挤温度较低时，表中 n 取较大值；相反，n 取较小值。

上述各种计算方法，显然并未能包含影响温挤单位挤压力的因素，并且各在其一定的试验条件下得到的。因此，在实际使用时，针对当时的条件进行适当的修正。

表6.1-3 拘束系数 C 和硬化系数 n

变形程度 ε_A/%	拘束系数 C		硬化系数 n	
	正挤	反挤	正挤	反挤
40	1.3	1.6	1.5～2	1.5～2
60	2.6	2.6	1.7～2.2	1.7～2.2
80	3.6	4.0	1.8～2.2	1.8～2.2

1.4.3 热挤压力的确定

(1) 图算法确定挤压力

图6.1-22为热（反）挤压力的计算图，使用方法是：根据挤压件的尺寸，求得挤压件的变形程度 ε_A 及系数 d/h；由第①坐标可求得压力系数 n；向左，可在第②坐标中根据不同钢材的高温抗拉强度求得未经修正的单位挤压力；由变形程度 ε_A 与挤压行程 h_x 可在第⑤⑥坐标中求得变形速度；在第⑦坐标中求得速度系数 K；在第③坐标中由未经修正的单位挤压力 p' 与速度系数 K 可以求得单位挤压力 p；另在第④坐标中由单位挤压力 p 与冲头直径可求得挤压力 F。

图6.1-23为热（正）挤压力的计算图，使用方法是：根据挤压件的尺寸，求得变形程度 ε_A；在第①②坐标中，由变形程度 ε_A 与凹模锥角 2α、毛坯相对高度 H_0/D_0 可求得压力系数 n；在第③坐标中可由压力系数 n 与不同钢材的高温强度极限求得未经修正的单位挤压力 p'；在第④坐标中由未经修正的单位挤压力 p' 与速度系数 K 求得单位挤压力 p，在此，速度系数 K 也按图6.1-22求得；在第⑤坐标中由单位挤压力 p 与冲头直径可求得挤压力 F。

(2) 计算法确定挤压力

1) 挤压模锻时总压力

$$F=F_j+F_m$$

挤压力（适用于 $D/d>1.1$）

$$F_j=K\left(\sqrt{\frac{D}{d}}-0.8\right)\sigma_bA$$

式中，F_j 为挤压部分的挤压力，N；K 为与选用设备有关的系数：

油压机取 $K=10$；

曲柄压力机的行程次数小于30～40次/min，取 $K=12.5$；

曲柄压力机的行程次数大小30～40次/min，取 $K=15$；

A 为与挤压力互相垂直的锻件投影面积，mm²，$D=1.13\sqrt{A}$；A_f 为挤出部分的横截面面积，mm²，$d=1.13\sqrt{A_f}$；σ_b 为金属在挤压模锻温度时的抗拉强度，MPa。

模锻力（适用于 $D_f\leqslant300$ mm）

$$F_m=5(1-0.001D_f)D_f^2\sigma_b$$

式中，F_m 为模锻终了时的模锻力，N；D_f 为锻件的最大直径，或等于换算直径（$D_f=D$），mm；σ_b 为金属在终锻温度时的抗拉强度，MPa。

2) 正挤压挤压力

$$F=\sigma_bm\frac{\pi}{4}D^2$$

① 平面凹模或带较大的凹模锥角 $\alpha\geqslant120°$（图6.1-24a）

$$m=2\left(\ln\frac{D}{d}+2\mu\frac{l}{d}+\frac{L}{D}\right)$$

② 带较小的凹模锥角 $\alpha\leqslant60°$（图6.1-24b）

$$m=2\left(\frac{L_1}{D-d}\ln\frac{D}{d}+2\mu\frac{l}{d}+\frac{L}{D}-\frac{1}{3}\right)$$

式中符号均按图6.1-24中所示：D 为凹模直径，mm；d 为凹模工作孔直径，mm；L 为凹模模腔高度，mm；l 为凹模工作带高度，mm；l_1 为凹模圆锥部分高度，mm；μ 为摩擦因数；σ_b 为金属在高温时的强度极限，MPa。

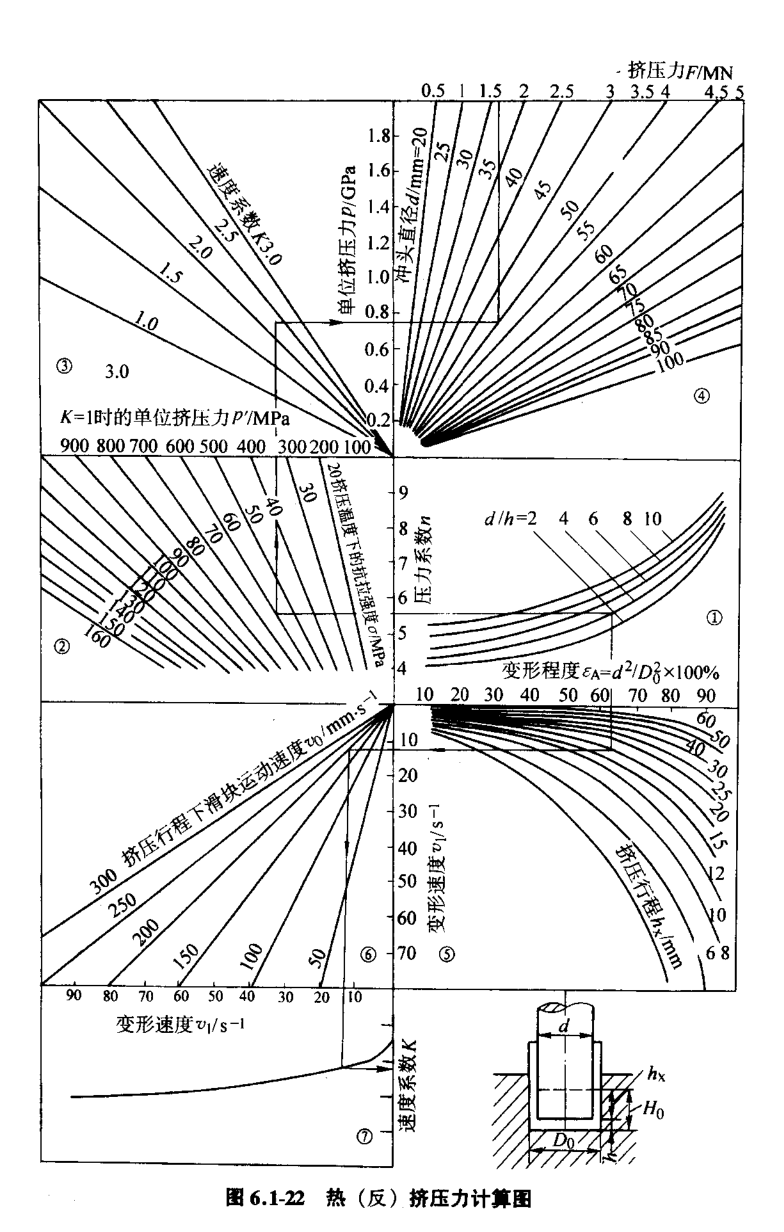


图 6.1-22 热（反）挤压力计算图

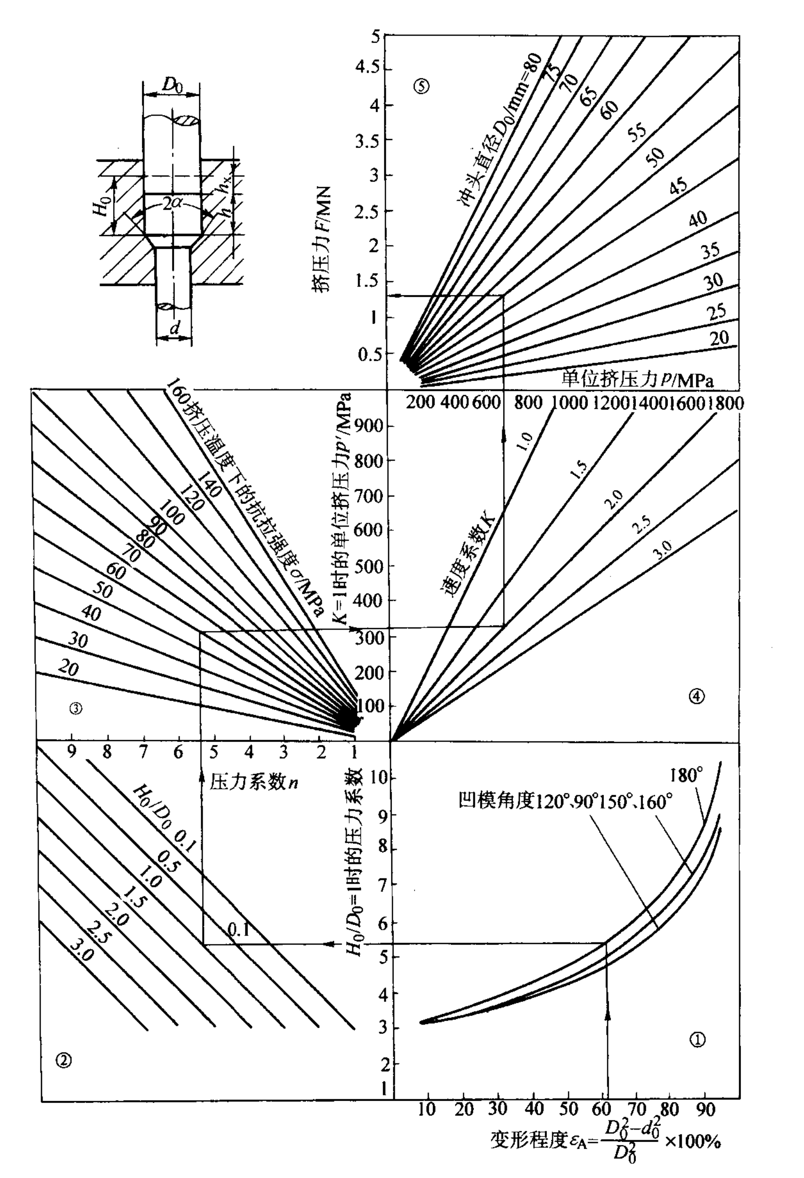


图 6.1-23 热（正）挤压力计算图



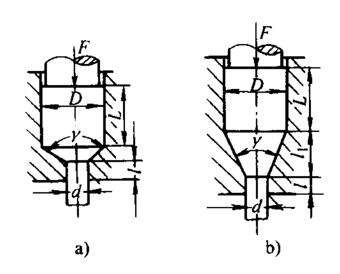


图 6.1-24 不同的挤压图

3) 反挤压挤压力

$$F = 0.785 d^2 K\sigma_b$$

式中，d 为凸模直径（挤压件内径），mm；K 为系数$\left(与\dfrac{凸模直径\ d}{挤压件壁厚\ t}有关\right)$，见图 6.1-25。

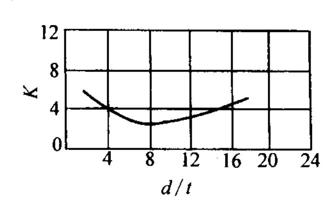


图 6.1-25 系数 K 值曲线

镦挤力的计算：

$$F = 4.985 \times (1 - 0.001D)\ D^2\sigma_b$$

式中，D 为凹模工作孔直径，mm；σ_b 为挤压终了温度时金属材料的抗拉强度，MPa。镦挤工作状态如图 6.1-26 所示。

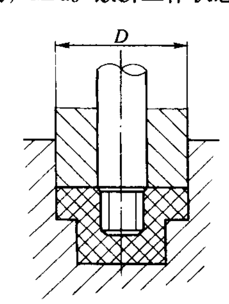


图 6.1-26 镦挤工作状态图

2 挤压工艺

2.1 冷挤压工艺

(1) 冷挤压用原材料

冷挤压用原材料中常用钢材种类有：碳素钢、合金结构钢、轴承钢、不锈钢及工具钢等。有色金属有：银、纯铝、防锈铝、锻铝、硬铝、紫铜、黄铜、锡磷青铜、镍、钛、锌及其合金、镁及其合金、可伐合金、泊莫合金等。

对冷挤压材料要求是变形抗力低、塑性好。在当前技术条件下，材料变形时单位压力以不超过 2 500 ~ 3 000 MPa 为限。超出该限模具使用寿命显著降低，甚至损坏模具。而塑性不足会使挤压件表面及内部开裂。有时为了不超过极限变形力及塑性，可增加加工次数及中间软化处理等辅助工序。

变形材料内部组织、表面状况、形状和尺寸精度、被润滑性等可根据挤压件技术条件及冷挤压变形方式考虑确定。

(2) 冷挤压毛坯形状和尺寸确定

正挤压用的毛坯形状主要有三种形式，见图 6.1-27。图 6.1-27a、b 由原材料直接制成：图 6.1-27c、d 由原材料经反挤压制成。反挤压用的毛坯形状主要有两种形式，见图 6.1-28，都由原材料直接制成。

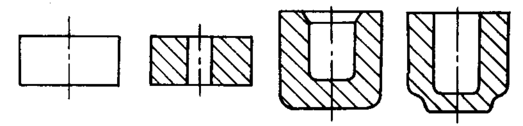


图 6.1-27 正挤压用的毛坯形状

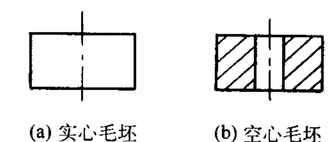


图 6.1-28 反挤压用的毛坯形状

毛坯的外形一般为圆形。对于用有色金属板料作为原材料进行冷挤压时，为了提高材料利用率，可以采用六方或其他不与凹模内腔形状相一致的多边形毛坯。

毛坯的体积按体积不变条件计算。如果冷挤压后还要进行切屑加工，则计算毛坯体积时还应加上修边量，即

$$V_0 = V_p + V_s$$

式中，V_0 为毛坯体积，mm^3；V_p 为挤压件体积，mm^3；V_s 为修边量体积，mm^3。

不同挤压件的修边量 Δh 可取 3 ~ 5 mm。

(3) 毛坯制备方法（包括预成形）

冷挤压用坯料品种不同，毛坯制备方法也有区别。冷挤压用材料品种有棒、板、线、管材及粉末材料等。但其中绝大多数是线、棒、板材。

线材多用于多工位连续生产螺栓等小型挤压件。线材最大直径可达 ϕ35 mm，下料用剪切下料而且是在润滑处理后进行，所以切断面难以润滑，且连续加工中间热处理无法安排，模具易产生磨损、失效。

棒材下料用封闭刃口模剪切、蓝脆剪切、高速剪切、锯切等方法。由于它是与成形工序分开进行的，所以润滑处理、中间热处理可随意安排。

线材和棒材剪切下料材料利用率高达 100%，材料规格调整容易，对生产备料方便，但坯料长径比不得小于 0.75，且剪切后断面形状不规则。

板材可采用普通冲裁和精冲方法下料。其优点在于坯料尺寸精度高、质量波动小，但材料利用率低（40% ~ 60%）、经济性差。因此常用于坯料高径比很小的情况。

(4) 坯料的软化处理

为降低毛坯的变形抗力、提高塑性、细化晶粒、改善组织性能、消除内应力，冷挤压加工前或多道挤压工序之间以及有时在挤压后为了消除残余应力，需进行软化处理。表 6.1-4 所示为常用冷挤压材料软化处理规范。

(5) 表面处理

表面处理是冷挤压工艺的一道关键工序，它的好坏对表面质量及模具寿命都有很大影响。因此，我们必须给予足够重视。对于黑色金属主要是进行磷化处理；对于不锈钢（1Cr18Ni9Ti）主要是进行草酸盐处理；对于非黑色金属如铝合金一般进行氧化处理。

(6) 润滑处理

毛坯经过表面处理以后，还要进行适当的润滑处理。经润滑处理的毛坯挤压时，润滑剂就成为毛坯表面的模具工作表面之间的介质，从而降低了它们之间的摩擦阻力，达到降低单位挤压力、改善冷挤压件质量和提高冷挤压模具使用寿命的目的。对于黑色金属的润滑处理一般采用皂化方法；对于有色金属的润滑处理方法列于表 6.1-5。



表 6.1-5 常用冷挤压材料软化处理规范

序号	冷挤压材料	热处理	规范	处理前硬度 HB	处理后硬度 HB	附注
1	纯铝 1 070～1 020	退火	420℃保温 2～4 h 随炉冷却	—	15～19	
2	铝镁合金 5A02	退火	390～400℃保温 5 h 随炉冷却	—	38～39	
3	硬铝 2A12	退火	400～420℃保温 4 h 随炉冷却到150℃	105	55～60	
4	硬铝 2A11	退火	410～420℃保温 4 h 随炉冷却 150℃		53～55	
5	锻铝 2A50	退火	410℃ ± 10℃保温 4 h 随炉冷却到150℃		50～51	
6	紫铜 T_1～T_4 无氧铜	退火	710～720℃保温 4 h 随炉冷却	110	38～42	也可采用淬火软化
7	锡磷青铜 QSn6.5～1.5	退火	650～750℃保温 4 h 随炉冷却到300℃		75～90	
8	黄铜 H62	退火	670～680℃保温 4 h 随炉冷却	150	50～55	也可采用 700～750℃水淬
9	黄铜 H68	退火	600～670℃保温 4 h 随炉冷却		45～55	也可采用 700℃ ± 10℃水淬
10	20Cr	退火	760℃保温 4 h，以 20℃/h 速度冷却 4 h 到 680℃保温 3 h，再以 20℃/h 速度冷却 2 h，然后随炉冷却到 350℃		125～140	
	20CrMnTi				150～165	
	30				135～150	
	45				150～165	
	40Cr				150～165	
11	10	退火	860℃保温 6 h，随炉冷却到 350℃		100～115	
	15				105～120	
	20				110～125	
	20Cr				120～135	
	30				130～145	
	45				140～155	
12	碳钢 Q215、Q235	长时间退火	920～960℃保温 8 h，随炉冷到 680℃再升温到 960℃保温 4 h，随炉冷到250℃出炉		100～110	所需时间较长，但热处理后硬度较低
13	纯铁 DT	退火	900℃ ± 10℃保温 3 h 随炉冷却		60～80	
14	1Cr13	退火	850～900℃保温 1～3 h，以 20～50℃/h 冷至 600℃后空冷		135～160	
15	2Cr13	退火	875～900℃保温 1～2 h，以 15～20℃/h 冷至 600℃后空冷		170～200	
16	奥氏体不锈钢	淬火	加热至 1 100℃保温 15 min（根据坯料尺寸界定）急冷至室温淬火处理（冰盐水或沸水）		130～140	

(7) 冷挤压变形工序设计

冷挤压变形是由毛坯加工出合格的挤压件，但都是通过不同的挤压工序来完成的，因此，设计合理的冷挤压加工工序是编制冷挤压工艺过程的中心工作。

合理的设计加工工序以冷挤压时金属流动规律为依据，综合考虑挤压方式、零件材质、形状、尺寸精度、成形极限、挤压件力学性能以及模具寿命等因素。

1）冷挤压件一次成形的许用变形程度。冷挤压加工时每道变形工序所允许的变形程度，称为许用变形程度。许用变形程度愈大，工序就愈少，则生产率就愈高。但随变形程度的增加，单位挤压力也增大，这将受到模具许用强度和设备能力的限制。因此，应严格控制许用变形程度的大小。

有色金属冷挤压时的许用变形程度如表 6.1-6 所示。

黑色金属的许用变形程度如下。



表 6.1-6 有色金属毛坯的润滑处理方法及使用效果

序号	材料名称	润滑剂成分	配置及使用方法	应用效果及说明
1	纯铝	硬脂酸锌	将经表面处理好的毛坯与粉状硬脂酸锌一起放在滚筒内滚动一刻钟，使毛坯牢固而均匀地涂上一层硬脂酸锌	1）冷挤浸壁厚均匀；2）金属流动性好；3）卸料力小；4）冷挤件表面粗糙度可达 0.8～3.2 μm
2	纯铝	十四醇 80%，酒精 20%	按规定比例混合后就可使用。但当气温较低时，十四醇应加热，以增加其流动性，使与酒精混合良好	润滑效果较好
3	铝合金 3A21 5A02	猪油 18%，汽缸油 22%，石蜡油 22%，十四醇 3%，四氯化碳 35%	猪油加热至 200℃后则加入少许四氯化碳，然后加入汽缸油和石蜡油，升温至 250℃稍冷后则加入工业甘油和十四醇。当冷却到 150℃时，再把四氧化碳全部加入	1）挤压性能较好；2）挤压件表面粗糙度可达 1.6 μm
4	纯铜 T1、T2、T3 黄铜 H62～H68	猪油 13%，十四醇 3%，纯机油 84%	将猪油加热至 200℃，几分钟后加入纯机油，两者搅拌均匀（约 3 min）最后加入十四醇	挤压件表面粗糙度很高
5	紫铜 T1、T2、T3 黄铜 H62～H68	工业豆油		润滑效果良好
6	纯铜 T1～T2、T3 黄铜 H62～H68	蓖麻油或透平油		润滑效果良好
7	黄铜 H62～H68	硬脂酸锌（粉末状）	敷上即可	润滑效果较好，特别是在正挤空心件，可以获得较好的表面质量，基本上避免了内孔壁出现环状裂纹，但挤压力略有增高
8	黄铜 H62～H68	表面钝化处理：在黄铜表面形成一层钝化膜作为润滑用。具体过程先退火→酸洗→钝化→浸入润滑剂	钝化工艺流程：汽油除油→热水洗（60～120℃）→冷水冲洗→钝化(5～10 s)→冷水冲洗→热水洗→干燥。钝化配方：略酐 200～250 g/L，硝酸 30～50 g/L，溶液温度 20℃，时间 5～10 s	
9	锌镉合金	羊毛脂与工业汽油按 1:1 或 1:1.5 混合	先将羊毛脂在 50～60℃的电炉中熔化，然后按规定比例与工业汽油混合而成	1）冷挤压件的表面质量较好；2）对模具材料及毛坯材料均有腐蚀作用
10	镍 Ni－1、Ni－2	表面镀铜挤压，因此润滑即可采用紫铜的润滑剂	按一般镀铜工艺对毛坯表面进行镀铜，镀铜厚 0.01～0.015 mm	效果良好
11	硬铝	工业菜油		效果良好；冷挤压件内孔表面粗糙度 0.2 μm 以下，外表面表面粗糙度 1.6 μm 以下
12	硬铝	皂化		效果尚好；冷挤压件内外表面粗糙度可达 3.2 μm 以下

表 6.1-7 有色金属一次冷挤压成形的许用变形程度

有色金属种类	冷挤压方式	许用断面缩减率 ε_A/%
铅、锡、锌、铝等软金属	正挤压	95～99
	反挤压	90～95
无氧铜、紫铜、黄铜、硬铝、镁	正挤压	90～95
	反挤压	75～90

备注：1. 润滑条件良好。
2. 低强度金属取上限，高强度金属取下限。

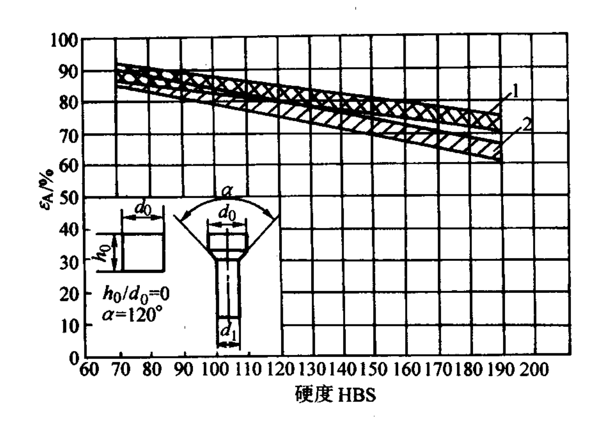
① 正挤压的许用变形程度。正挤压时，毛坯材料硬度与许用变形程度的关系见图 6.1-29。该关系曲线由实验测得，实验条件为：毛坯相对高度 $h_0/d_0=1.0$、凹模锥角 $\alpha=120°$、毛坯经退火软化、表面磷化加皂化处理，模具的许用单位压力分别为 2 000 MPa 和 2 500 MPa。

除此以外，凹模锥角、毛坯相对高度 h_0/d_0 增加对许用变形程序有一定影响。

② 反挤压的许用变形程度。反挤压时，毛坯材料硬度与许用变形程度的关系见图 6.1-30。该关系曲线由实验测得，实验条件为：毛坯相对高度 $h_0/d_0=1.0$、凹模锥角 $\alpha=$



120°、毛坯经退火软化、表面磷化加皂化处理，模具的许用单位压力分别为2000 MPa和2 500 MPa。



退火后的钢材硬度

钢号	硬度 HBS
纯铁	70
10	90
20	110
20Cr	140
45	150
40Cr	160
40MnB	170
GCr15	190

图 6.1-29　黑色金属正挤压许用变形程度（$h_0/d_0=1.0$，$\alpha=120°$）
1—许用单位挤压力 2 500 MPa；2—许用单位挤压力 2 000 MPa（剖面线与交叉线部分为等压带）

退火后的钢材硬度

钢号	硬度 HBS
纯铁	70
10	90
20	110
20Cr	140
45	150
40Cr	160
40MnB	170
GCr15	190

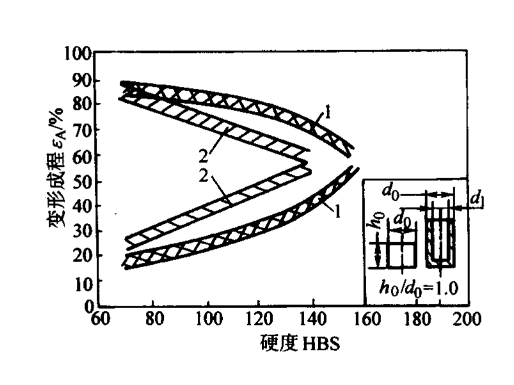


图 6.1-30　黑色金属反挤压的许用变形程度（$h_0/d_0=1.0$）
1—许用单位挤压力 2 500 MPa；2—许用单位挤压力 2 000 MPa（剖面线与交叉线部分为等压带）

反挤压毛坯的相对高度大小对最大许用变形程度影响不大。

③ 复合挤压一次成形范围可参照单纯正挤压和反挤压的一次成形范围确定。

④ 减径挤压一次成形范围是变形程度较小的正挤压，如图 6.1-31 所示。毛坯在进入变形区以前不能产生任何塑性变形，因此减径挤压的一次成形范围应综合考虑坯料材料特性、变形抗力、挤压件的变形程度、模具的许用单位压力、摩擦润滑条件等因素，由此来确定主要尺寸参数。如对钢零件，减径挤压的一次许用变形范围是：当锥角 $\alpha=15°\sim30°$时，许用变形程度 $\varepsilon_F\leqslant25\%\sim30\%$。如图 6.1-31 所示为减径挤压工艺尺寸。

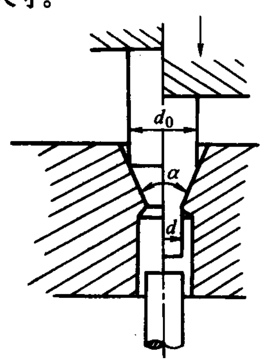


图 6.1-31　减径挤压工艺尺寸

⑤ 径向挤压件一次成形范围，考虑不产生纵向弯曲，径向挤压不产生纵向表面裂纹，其一次成形范围如图 6.1-32 所示。图中实线范围的区域为可以一次成形范围，影线部分为引起纵向弯曲或表面裂纹区域。

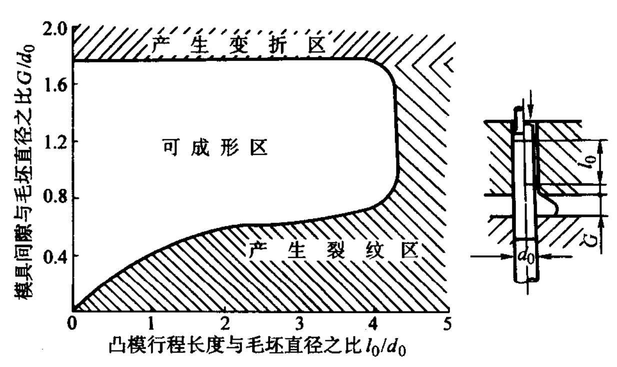


图 6.1-32　径向挤压成形范围

(2) 对冷挤压件形状的要求

非对称零件、壁部底部过薄、存在凹槽、细而深的孔、尖角锐角材料流动困难，一般尽量避免采用冷挤成形。

对多道工序成形时，合理确定工序间尺寸配合关系也是十分重要的。

多阶梯轴类零件的变形工序制定，当相邻两部分的小直径与大直径比大于 0.85 时，可先进行减径挤压成形，再镦

挤直径较大的两端部。当相邻部分的小直径与大直径之比小于 0.85 时，可先正挤压成形加减径同时进行或多次减径挤压，每次减径挤压的直径比不小于 0.85，最后再镦挤头部，如图 6.1-33 所示。

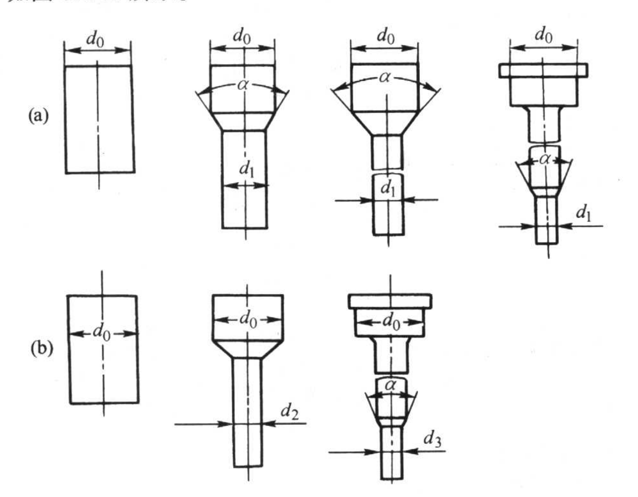


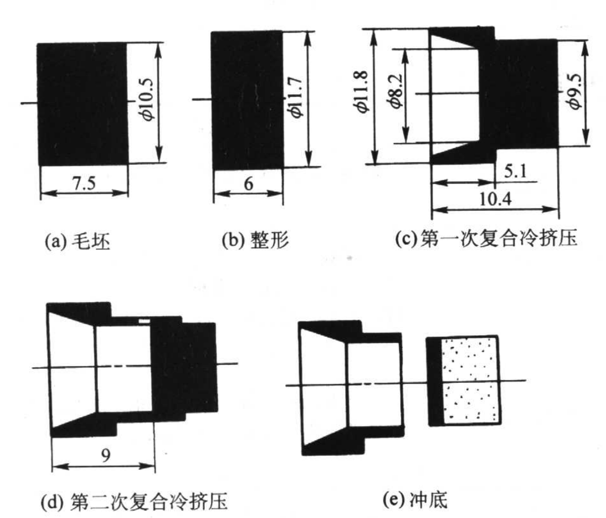
图 6.1-33 多阶梯轴成形工序

杯形件的反挤压成形时，杯孔过深除容易使凸模折弯易断外，经常会造成产品壁厚不均匀加剧，因此在工序设计时，还应考虑允许的壁厚差 ΔS 的大小来决定杯形孔深的加工范围。实践证明，杯形件允许的壁厚差 ΔS 越小，杯孔深 h 与直径 d 之比 $R = h/d$ 越小。对钢零件反挤压杯形件时，壁厚差一般不超过 0.3 mm，因此相对杯形件孔深的 R 值也有一定限制。当 $R = 1.0 \sim 1.5$ 时，$\Delta S \leqslant 0.05 \sim 0.15$ mm；当 $R \geqslant 1.5 \sim 3.0$ 时，$\Delta S \leqslant 0.15 \sim 0.30$ mm；当要求杯形件壁厚差 ΔS 较小，且相对孔深 R 较大时，则零件进行两次反挤压成形；或先反挤压成形，再正挤压成形。

(3) 挤压余块设计

复合挤压变形工序制定时，如杯杆复合挤压时，为了获得壁部较薄的零件、减少挤压力，合理地设计和利用工艺余块是至关重要的。

如图 6.1-34 所示为钢质管套零件，零件上口部有斜度，其最小壁厚仅为 0.65 mm，如采用一般正挤压一次成形，其变形程度远远超过许用变形程度，模具寿命显然会不高。现设计带有工艺余块的二次杯杆复合挤成形，第一次复合挤压确保零件上端部内锥孔尺寸形状，第二次复合挤压时，完成



(a) 毛坯 (b) 整形 (c) 第一次复合冷挤压 (d) 第二次复合冷挤压 (e) 冲底

图 6.1-34 管套复合次冷挤压与刚性平移工艺

直壁孔部分变形，头部刚性平移不参加变形，然后冲压底部工艺块，从而得到所需挤压制品。

图 6.1-35a，是复合挤压较困难成形零件。采用通常复合挤压成形时，难以成形。通过增加工艺余块进行复合挤压成形，不仅降低了挤压力，也较好地解决了零件尺寸形状问题。

图 6.1-35b 为薄壁的底部带孔的杯形件成形。采用工艺余块进行复合挤压可顺利进行挤压成形，然后冲去工艺余块可得到满意产品。

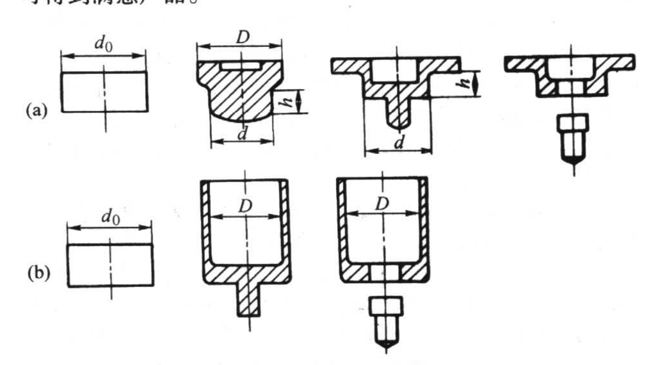


图 6.1-35 带有工艺轴的成形工序

如图 6.1-36 所示为深孔薄壁零件冷挤工艺。为了达到该零件孔深和底部端面平整，采用如下多工序挤压得到较好解决。

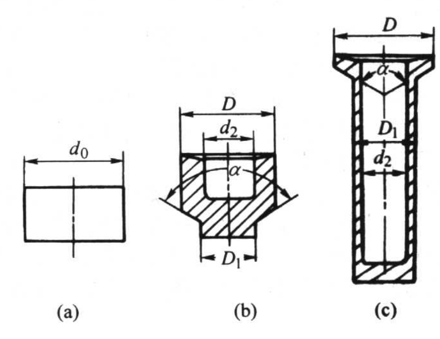


图 6.1-36 深孔零件冷挤工艺

第一次反挤时底部 D_1 处达到零件尺寸要求，然后经过空心正挤、上端面工艺余块去除，即可生产出满意的制品。且零件下端部由于外端作用阻止金属流动就得到内孔底部平整，外端底部形状合乎要求的深孔薄壁制品。

(4) 冷挤压时力学性能变化

金属在冷挤压时，在强烈的三向压力作用下，金属晶粒被破碎，使原来较大的晶粒挤压后变成为等轴细晶粒组织，因而提高了强度。挤压变形愈大，晶粒形状、大小也改变越大，相对增加晶粒边界的表面积，增加了变形阻力，即成为强化材料的原因之一。这样在冷挤压时，材料由于加工硬化使强度随变形程度的增加而增加，塑性指标略有下降。因此冷挤压时，为满足同样强度的零件，可用含碳量低的钢种代替含碳量高或低合金钢制品。

2.2 温挤压工艺

(1) 温挤前准备工序

坯料形状与尺寸确定和冷挤压一样。坯料体积可按变形前后体积不变计算，为保证产品质量和模具寿命，坯料直径加热后应接近或稍小于凹模模腔直径。这时应考虑坯料加热时直径的膨胀和凹模腔受热后的膨胀相配合。

温挤压用的坯料，当挤压温度低于 550 ~ 600℃时，应进



行软化处理及磷化处理；当温度高于600℃时，坯料的原始状态对温挤压力影响不大。经过完全退火或球化退火的坯料在低于600℃成形时，变形力低于热轧状态坯料；当高于600℃挤压时，由于动态和静态回复和再结晶，坯料预先软化处理与否，对温挤压变形力无显著影响。

温挤压时坯料的加热方法，准确控制加工温度对保证产品质量有重要作用。因此，温挤压前采用煤气加热、接触电阻加热、中频感应加热或连续电阻式加热效果都较好。尤其是中频感应加热较普遍，其主要优点是加热时间短、生产连续、有节奏、氧化少、温度控制准确，易于实现生产自动化。而且占地面积小、劳动条件好。对钢中频加热时，坯料尺寸 $\phi25\sim100$ mm 时，推荐频率为 2 000 Hz 为宜，直径再小采用高频加热为好；坯料直径大于 100 mm 时，建议采用工频加热。中频加热时所消耗的电功率一般为 0.35 ~ 0.4 kW·h/kg 钢左右。

为了防止坯料加热中氧化脱碳，可采用惰性气体或真空加热。生产实践证明，一般电炉加热如零件尺寸小，加热时间短，影响不大。例如，电炉中加热 45 钢，加热温度 800℃，加热 20 min，挤压出产品氧化膜极薄。经酸洗或喷砂后表面粗糙度仍可保持 $<2.5\ \mu m$，挤压件和原材料一样，都见不到脱碳层。又如轴承钢在 700℃ ± 20℃温挤压时，挤压后轴承圈表面氧化膜极薄，脱碳几乎不产生。经 65% 左右反挤压变形，脱碳层比原始坯料脱碳层降低一半以上。

模具在挤压前预热，以免对某些高合金钢模具造在损坏和坯料接触模具后冷却过快工件尺寸波动太大超差。可以在模具上设计专用的电阻预热或采用喷灯或悬放烧红的钢块进行预热。模具预热温度可在 150 ~ 300℃左右，预热温度视温挤时坯料的温度高低来决定。温挤压在连续生产过程中，模具温度会不断升高，严重的会影响模具寿命和挤压件尺寸精度。故在温挤压模具设计中应考虑模具冷却装置。

(2) 温挤压的润滑

温挤压成形时为了减少金属与模具间的摩擦阻力，改变金属流动与产品质量，提高模具使用寿命，减少变形力和变形功的消耗都是十分重要的。特别是温挤压的润滑好坏对温挤成形过程顺利进行有着密切关系。适于温挤压润滑剂列于表 6.1-7。

2.3 热挤压工艺

金属坯料在挤压前加热到完全再结晶温度以上固相线温度以下温度范围内进行变形，称为热挤压。采用热挤压技术可以制造等截面的长形件、棒、管、型材和各种不同形状尺寸的零件。表 6.1-8 列出热挤压用材料和制件用途。

表 6.1-7 温挤实用润滑剂

润滑剂成分或名称	适用范围	备注
水剂石黑或油剂石墨润滑剂	在 800℃以下温挤碳钢、合金钢、工具钢，也可用于有色金属温挤	商业温挤石墨润滑剂常加入改善石墨润滑或抗氧化性能的其他成分
石墨 + 二硫化钼 + 油酸（质量比：26:17:57）	在 800℃以下温挤碳钢、合金钢、工具钢	工作时发出呛味，劳动条件差
氧化铅（用油调和）	在 400℃以上温挤不锈钢	因有毒，不建议使用
氧化硼（B_2O_3）+ 25%（质量分数）石墨或氧化硼 + 33%（质理分数）二硫化钼	在 600℃以上温挤碳钢、合金钢、不锈钢	最好将坯料预热在 600℃左右，然后涂上混合的润滑剂粉末
玻璃润滑剂：29% ~ 48% P_2O_5，50% ~ 58% Na_2O，2% ~ 20% Al_2O_3 或 40% ~ 68% P_2O_5；20% ~ 55% Na_2O；2% ~ 10% Al_2O_3。(均以质量分数) 玻璃润滑剂：石英砂（SiO_2）23% + 硼酸（H_2BO_3）41% + 红丹粉（Pb_3O_4）30% + 氧化铝（Al_2O_3）1.8% + 硝酸钠（$NaNo_3$）4.2%（质量分数）	400 ~ 650℃温挤碳钢、合金钢和不锈钢 在 700 ~ 800℃温挤碳钢、合金钢和不锈钢	清理模具困难；涂在坯料上，必须预热坯料至 120℃
$Na_2B_4O_7$ + PbO 及 $Na_2B_4O_7$ + Bi_2O_3	在 500℃以上温挤各种钢、高温合金和精密合金	
氯化石蜡 85% + 二硫化钼 15%	200 ~ 300℃左右温挤不锈钢和高温合金	坯料须先经草酸盐处理，也可以先经镀铜或镀镉处理
铝粉	用于有色金属温挤	

表 6.1-8 热挤压用材料和制件用途

材料	用途	材料	用途
铅及其合金	煤气、水道用管材，电缆包皮焊条	镍及其合金	耐蚀、耐热管（最小壁厚 5 mm），透平，叶片
铝及其合金	建筑、车辆、船舶调度通讯设备，飞机零件毛坯用型材（最小壁厚 1 mm），电缆包皮、运动器具用管材	钢	不锈钢管，不锈钢包层钢管，热交化用管材，轴承圈毛坯用钢管，零件毛坯用型材，土木、建筑用型材（最小壁厚 2.5 mm）
镁及其合金	飞机、火箭、车辆船舶用型材（最小壁厚 1.5 mm）	钛及其合金	喷气发动机零件，化工容器，热交换器，燃气透平零件（最小壁厚 5 mm）
锌及其合金	低压冷水管，建筑用扶手、电器零件（最小壁厚 1.5 mm）		
铜及其合金	热交换器、乐器、通信器材、建筑用型材（最小壁厚 1.25 mm）	其他特殊金属	铀、锆、铍、铌等原子反应堆零件，钨制火箭喷管

热挤压工艺过程包括：毛坯制备→坯料加热→表面润滑处理→热挤压→脱模和清除产品润滑剂→精加工。热挤压工艺由于挤压温度高，对材料塑性可以得到较好改善，变形抗力大大降低。对强度较高材料，冷温态变形时塑性差。易产生开裂材料如含铅铜合金、镁及镁合金、高温合金、合金钢等。近年来开始应用热挤压变形后，对制品进行控制冷却，对改善产品力学性能极为经济有效。由于挤压工艺一次变形工序少，生产较灵活，广泛应用于多品种、小批量生产。热挤压可以在专用挤压机上进行，也可在液压机、机械压力机、摩擦压力机和高速锤上进行。

(1) 坯料的加热

在热挤压前坯料要经过预热后再加热到挤压温度，毛坯预热目的是防止表面产生裂纹，节约能源和提高生产率。预热温度一般在无剧烈氧化的温度，例如对钢预热650℃，不锈钢、高合金钢预热850℃，然后根据坯料材料种类不同加热到热挤压要求的温度。加热可用电阻炉或中频感应加热炉。加热时必须严格控制加热温度、加热速度和保温时间，有的合金应注意加热时气氛。加热也可在玻璃熔融炉中加热，玻璃不仅可防止坯料氧化，而且对坯料表面氧化皮起到熔解作用，在模腔内起到润滑作用。

(2) 表面润滑处理

在热挤压前对锭坯表面进行表面润滑处理主要是减小摩擦阻力、降低挤压力和提高产品质量、延长模具寿命。润滑方式有润滑剂、石墨、二硫化钼、水基或油基石墨。对黑色金属常用玻璃润滑剂。另一种是用较软金属作为锭坯的衬套。挤压筒、挤压垫不润滑，穿孔针需进行润滑，模具则视具体情况有选择的进行润滑。

热挤压黑色金属的玻璃润滑剂具有无定形结构、各向同性。在受热后逐渐软化，黏度变小而成液态，变化玻璃组分，可在500~2 000℃温度范围内使用，使用性能主要指标黏度控制在10~100 Pa·s范围。另外，湿润性要好，玻璃层厚度0.01~0.05 mm为好。表6.1-9中列出热挤压时常用玻璃润滑剂的化学成分及应用范围。

表6.1-9 热挤压用玻璃润滑剂 %

化学成分 / 玻璃编号	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O	B_2O_3	Fe_2O_3	MgO	应用
A (1)	56	15	18	2	7			其他元素2%模芯棒
A (2)	65	3	10	15				其他元素7%芯棒
A (5)	60	3	15	15	3	2	2	润滑毛坯表面
A (13)	60	3	15	13	5	2	3	坯表面碳钢、不锈耐热钢等
B (21)	65	3	13	5	5	3	7	坯表面碳钢、不锈耐热钢等
其他	60~72	4~5	8~14	8		9		坯表面碳钢、不锈耐热钢等

(3) 模具预热

热挤压前模具的预热必须在挤压开始前进行，包括对模具、挤压筒、挤压轴、挤压垫、穿孔针的预热。上述工模具在整个挤压过程中应保持一定的温度，其目的在于减少挤压过程中的热应力及热疲劳，延长期寿命。同时工模具预热后可以延缓锭坯的冷却，从而可减少挤压力及工模具负荷。

(4) 热挤压的温度-速度条件对挤压成形最大单位挤压力和塑性的影响

热挤压的温度-速度条件对挤压成形的变形抗力及塑性影响如表6.1-10所示。

表6.1-10 钢及有色金属及其合金热挤压温度和速度允许的最大单位挤压力和挤压比

金属种类	最高挤压温度/℃	最大单位挤压力/MPa	最大挤压比	挤压速度/$m \cdot s^{-1}$
铝及其合金	420~480	300~1 000	60~1 000	0.1~1.25
镁及其合金	360~420	800~1 000	10~100	0.16~1.25
铜及其合金	700~900	300~800	30~700	0.1~5.0
锌及其合金	200~350	700~900	50~200	0.2~0.4
钛及其合金	800~900	500~1 000	5~15	0.5~0.75
碳素钢	1 150~1 200	400~1 200	10~50	3.0~6.0
合金钢	1 150~1 200	500~1 200	10~50	3.0~6.0
不锈钢	1 100~1 150	400~1 200	10~35	3.0~6.0

为了得到高质量产品，必须对挤压温度、挤压流出速度和变形程度等工艺参数综合考虑，达到最佳配合。挤压流出速度的下限受毛坯在挤压筒中冷却和模具过热限制。但挤压温度过高以及流出速度过快使平均变形抗力的增加易产生过热现象，引起晶粒粗大或材料出现开裂。因此，具体设计热挤压工艺参数，在一般理论分析的基础上通过工艺试验，考察产品质量和实际生产经验结合加以确定。

3 挤压模具

3.1 挤压模具的要求及特点

根据挤压件的技术要求，工艺特点，考虑到生产性质与规模，正确设计和合理选择模具结构，延长模具使用寿命是挤压工艺取得成功的关键。挤压模具在成形过程中，经受高压或高温和激烈的摩擦条件下工作，对挤压模的要求如下。

1) 具有足够强度、硬度和韧性。

2) 在反复变形力与热的作用下具有高的抗磨损、好的热硬性、热稳定性。

3) 制造工艺性好，有利于热锻、热处理及切削加工。

4) 模具工作部分避免尖角过渡，固定简洁可靠，且拆换方便和好的通用性。

5) 挤压时操作安全方便，易于实现机械化自动化生产。

6) 成本低廉，经济效果好。



3.2 挤压模具的典型模具结构

挤压模一般由如下部分组成：
工作部分：凸模、凹模；
卸料顶出部分：卸料板、顶杆、弹簧；
传力部分：压力垫板；
导向部分：导柱、导套；
紧固部分：上下模板、模柄、固定圈、螺钉等。

图 6.1-37 是一般常用的冷反挤通用模具，有导柱导套导向，工作可靠、精度高、使用方便、寿命长。由于挤压力较大，在凸、凹模下部，上下模板上都用垫板或多层垫板，对均匀分散传递挤压力起到了缓冲作用，垫板多采用强度较高的工具钢制造。卸件时零件停留在凹模内由下顶杆顶出；停留在凸模上可用卸料板取出，卸料板亦可采用模架导柱导向。

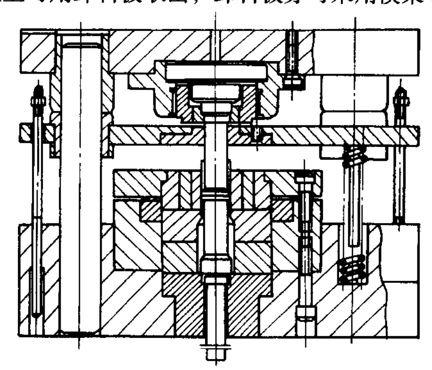


图 6.1-37 反挤压通用模具（有导柱导套导向）

温挤压模具在结构设计时基本上沿用冷挤压模具的设计原则。例如，为了便于金属流动，减少摩擦阻力，反挤凸模和正挤凹模都必须设计有工作带，凹模采用预应力圈以确保强度等。但是基于温挤压本身的特点，需要注意下列几点。

1）在挤压过程中，模具工作零件的某些部分被加热到很高的温度而使硬度降低，加速磨损。这样，在设计模具时，一定要考虑使容易磨损的部分的镶块便于更换修补及进行冷却。如配有冷却系统的温热挤压模（图 6.1-39），其上模板 1 与下模板 14 通过导柱 7 和导套 8 导向连接，为了保证凸模 4 和凹模 10 具有较高的同轴度，配置了凸模固定块 3 和凹模支撑圈 11。挤压后的零件从凹模中顶出是由下顶出装置中的顶杆 15、16 和顶料杆 13 来实现的。通过卸料板 9 和镶块 5，可将卡在凸模上的零件卸下。挤压时，热坯料的热量将使凹模温度升高，利用冷却水从支撑圈 11 和固定外套 12 之间的空隙流过来冷却。而压缩空气从压紧螺母 6 中的通道流过，则可使凸模冷却。这样一来，使温、热挤压模的温度稳定在较低的情况下顺利工作。

2）设计组合凹模要考虑由于温度关系而发生的尺寸变化对预应力效果的影响。

3）为确保挤压件的尺寸精度，必须使模具温度稳定在规定的范围内进行工作，为此，必须在模具结构上考虑预热和冷却装置，如图 6.1-38 所示。

4）为了提高挤压件质量和模具寿命，应经常清出沉积在模具内的润滑剂残渣，分别由卸件板和凹模顶块刷掉。

图 6.1-38 和图 6.1-39 分别所示是一种正向温挤和反向温、热挤压模的结构，配有单独的可控电加热器，从而保证了凹模的温度稳定在所规定的温度范围内，有利于温挤成形及获得高质量的零件。

图 6.1-40 是在曲轴压力机上进行钢件热挤压的通用模，若生产批量大，可作为专用模具。可完成镦粗—挤压—冲孔三个工序。可进行正挤压、反挤压和复合挤压。挤压凹模的外轮廓槽口处，通水冷却。

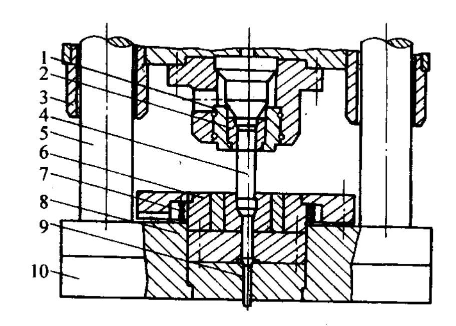


图 6.1-38 带有加热器的正向温挤压模具

1—凸模紧固圈；2—定位压紧圈；3—导套；4—凸模；5—导柱；6—凹模；7—加热器；8—垫片；9—顶杆；10—下模板

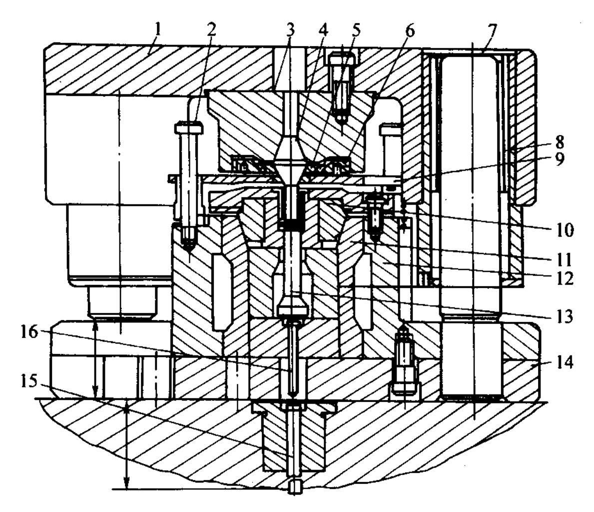


图 6.1-39 配有冷却系统的温热挤压模具

1—上模板；2—螺钉；3—凸模固定块；4—凸模；5—镶块；6—压紧螺母；7—导柱；8—导套；9—卸料板；10—凹模；11—支撑圈；12—固定外套；13—顶料杆；14—下模板；15、16—顶杆

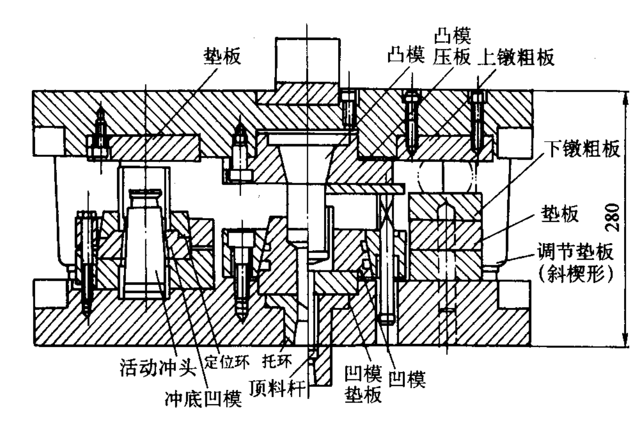


图 6.1-40 三工位热挤压模具

3.3 挤压模具工作部分设计

(1) 反挤压凸模设计

反挤压凸模在挤压过程中，承受单位挤压力最大，极易磨损、变形和破坏。合理地设计凸模工作部分尺寸形状可以改善金属流动，减少挤压力，延长模具的工作寿命。

图 6.1-41 是用于黑色金属挤压的几种凸模，图 6.1-41a、b 两种凸模应用较多，尖端锥形凸模，不仅可以降低挤压力，而且由于钉扎前端作用，可增加凸模稳定性。一般 $\alpha = 5° \sim 9°$为宜，效果也好，在生产中应尽量采用。图 6.1-41c 平端凸模适用于反挤压平底零件，对有色金属冷挤压和温、热



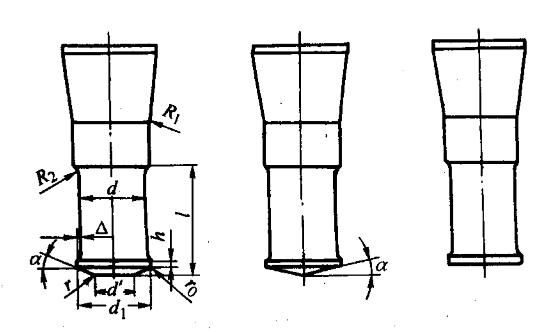


图 6.1-41 反挤压凸模的形式

挤压单位挤压力较小。但挤压力比锥形带底凸模约高 20% 左右，平端锥形模前端锥度一般 $\alpha=27°$为好。α 取得过大会因坯料端面不平而导致杯形件壁厚差过大，使凸模受到很大侧向力，在挤压过程中折断。

反挤压凸模工作带：黑色金属冷挤压 $h=2\sim3$ mm，有色金属 $h=0.5\sim2$ mm；温、热挤压黑色金属 $h=3\sim5$ mm，有色金属 $h=2\sim4$ mm。

当反挤压变形不均的杯形件时，凸模工作带的长度在变形大的部位和变形阻力大的部位，应适当减少凸模工作带的高度。

凸模后隙直径 $d_1=d-$（0.1～0.3）mm，有利于减少金属流动阻力及卸件阻力。

图 6.1-42 列出了合金钢凸模长径比与挤压力关系。反挤凸模 h_1/d 值过大，允许单位挤压力降低，

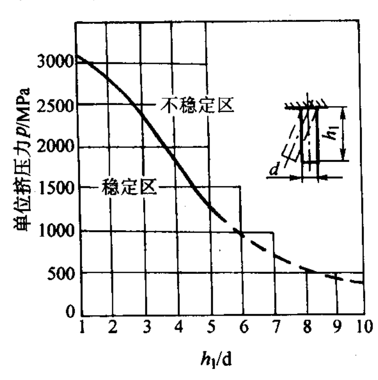


图 6.1-42 凸模工作部分长径比 h_1/d 凸模的工作极限应力

对黑色金属挤压 $h_1/d\leqslant3$

对有色金属挤压 $h_1/d\leqslant6\sim8$

凸模稳定性可用下式校核计算：

$$P_{临界}=\frac{\pi^2 EJ}{(\mu l)^2}$$

式中，E 为凸模材料弹性模量，对模具钢 $E=2.2\times10^8$ MPa；J 为凸模截面惯性矩，对圆形凸模 $J=\frac{\pi d_1^4}{64}$；μ 为长度系数，取决两端支持方式，可取 $\mu=0.5\sim2$。对一端固定一端自由状态 $\mu=1.5$；l 为凸模有效长度。

对于反挤压纯铝零件，由于凸模 $h_1/d>3$，为了增加其稳定性，凸模端面经常提高粗糙度和加工出工艺沟槽，如图 6.1-43 所示。凸模凹槽在开始挤压瞬间，钉扎在坯料端面上，而提高凸模稳定性，凹槽形状需对称于凸模中心，保持良好同轴度，否则反而会在挤压时发生偏移，造成凸模折断。

工艺凹槽的宽度一般取 0.3～0.8 mm，深 0.3～0.6 mm，工艺凹槽顶部应用小圆弧光滑相连。对黑色金属由于单位挤压力很大，凸模工作端面不允许加工工艺凹槽，以免应力集中而开裂。

（2）反挤压凹模设计

反挤压凹模按模具结构形式凹模可分为整体模、分割式模（镶嵌模）。为了减少模具受力的应力集中，采用“未裂先分”原则可大大提高模具寿命。

图 6.1-44 是常见的反挤压凹模结构型式，a、b、c、d、e 五种凹模，主要用于挤压有色金属薄壁件。整体凹模结构简单，制造方便，但整体式凹模在底部转角 R 处产生下沉和产生应力集中，极易开裂。图中 c、d、e、f、g、h、i 是分割式凹模，寿命比整体式凹模长。图 6.1-45 指出整体凹模当凹模角部 $R=2$ mm 时，应力集中最大处的 σ/p_1 值高达 2.8 倍，造成挤压时很容易在角部开裂。减少应力集中最有效的措施是采用分割式凹模。

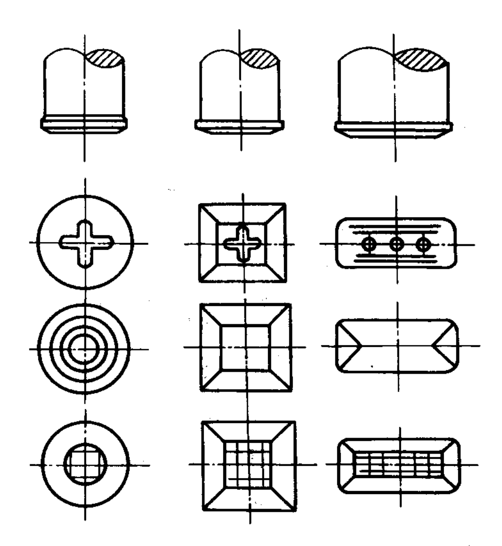


图 6.1-43 有色金属反挤凸模底端面工艺沟槽

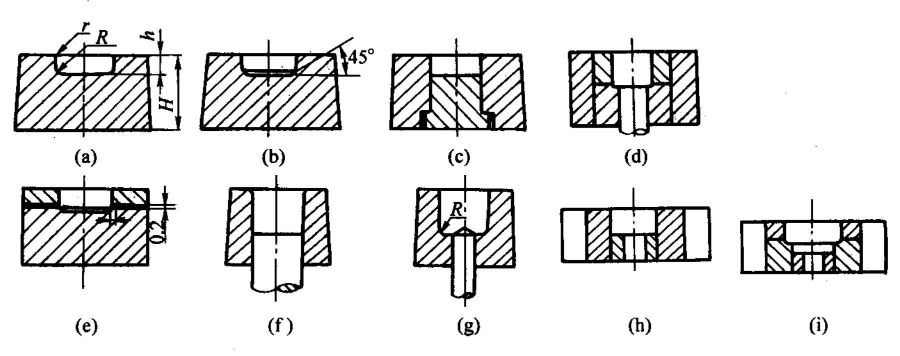


图 6.1-44 常用反挤压凹模结构型式

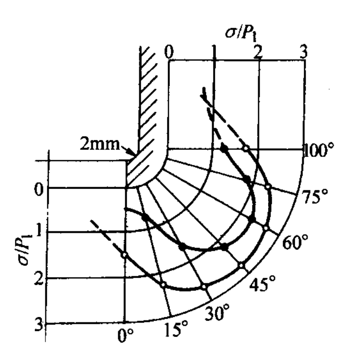


图 6.1-45 凹模角部的应力分布状态

反挤压时，凸凹模之间的间隙对反挤杯形件的壁厚有很大影响，零件尺寸还随凸模和凹模的磨损、温度的高低而变化，冷挤压时，当零件外形尺寸要求准确，杯形件外形尺寸 $D_{-\Delta}^{\ 0}$ 零件壁厚为 t，则

凹模工作直径 $D_d = (D-\Delta)^{+\delta_d}_{\ 0}$

凸模工作直径 $d_p = (D-\Delta-2t)^{\ 0}_{-\delta_p}$

冷挤时零件内形尺寸要求准确时，反挤杯形件内形尺寸 $d^{+\Delta}_{\ 0}$，壁厚为 t，则

$$d_p = (d+\Delta)^{\ 0}_{-\delta_p}$$

$$D_d = (d+\Delta+2t)^{+\delta_d}_{\ 0}$$

式中，D_d 为凹模工作直径；d_p 为凸模工作直径；Δ 为零件公差；t 为零件的壁厚；δ_d 为凹模直径制造公差；δ_p 凸模直径制造公差。

δ_d、δ_p 取零件公差的 1/5～1/10，但不超过 IT6（对孔）或 IT5（对轴）公差等级。

一般温挤压时零件尺寸增大 0.6%～1.0%左右；热挤压时零件尺寸增大 1.0%～1.5%左右。反挤压凹模型腔深度（图 6.1-46）

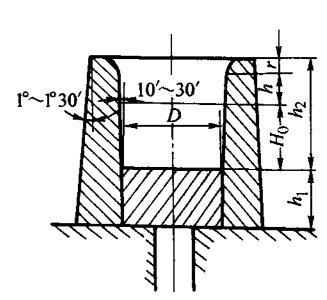


图 6.1-46 直筒反挤压凹模

$$h_2 = H_0 + h + r$$

式中，H_0 为毛坯高度；h 为凸模工作带以下高度；r 为反挤凹模入口处圆角半径，一般取 3～5 mm。

凹模底部垫板高度 h_1 应考虑刚度、强度及顶出零件导向要求等因素决定，一般取 $h_1 = (0.5\sim1.0)D$。

为了减少挤压时金属流动阻力和顶出零件阻力，可以将凹模腔内壁做出 10′～20′斜度，凹模外侧为了组合凹模配合需要常制作成 1°～1°30′斜度。在凹模外侧底部常留有 3～5 mm 的直线部分，使凹模预应力圈压配后，该直线段留在外部，以利于凹模安装定位。

这样反挤凹模总高度 $H = h_1 + h_2 = H + h_1 + h + r$。

(3) 正挤压凸模设计

正挤压凸模有四种型式，如图 6.1-47 所示。实心凸模按型式 a 设计，在各台阶相接过渡处应该尽量加入圆角半径，光滑过渡，以避免应力集中。对空心件正挤压时，凸模结构型式有 b、c、d 三种。对变形力较低的有色金属，温、热挤压可以采用整体式芯轴结构凸模，结构简单，制造方便。但对黑色金属冷挤或温挤时，凸模本体与芯轴的直径急剧过渡区极易断裂。应尽量采用 c、d 组合型式。凸模由本体和芯轴两部分组成，对芯轴较细的挤压件挤压时，活动芯轴可随金属同时向下移动一段距离，这样可以改善芯轴受拉情况，防止芯轴被拉断的可能性。有时为了有易金属流动和从芯轴上脱卸，芯轴部分可制成一定锥度 10′～30′左右。芯轴的直径相当于零件内孔直径，但应稍大于毛坯内孔直径。芯轴长度等于空心毛坯高加上凹模锥口部分长度和工作带长度。凸模直径大小，按凹模型腔设计，其长度≥挤压工作行程加卸料板厚度。定位及支承部分直径可取 1.2～2.0 倍凸模直径。

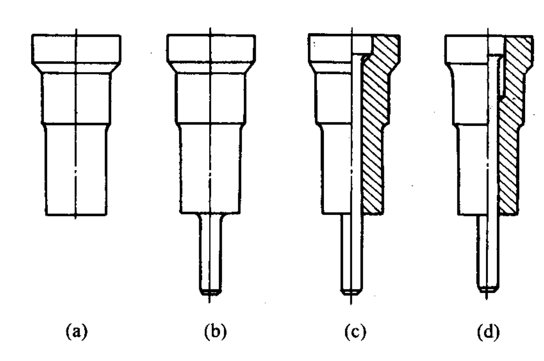


图 6.1-47 各种型式的正挤压凸模

(4) 正挤压凹模设计

图 6.1-48 为常见的正挤压凹模的结构，型式 a 为整体式正挤压凹模结构，凹模底部转角处由于应力集中极易横向开裂，其余为纵向分割和横向分割，为了提高凹模的承压强度，常设计成组合凹模。

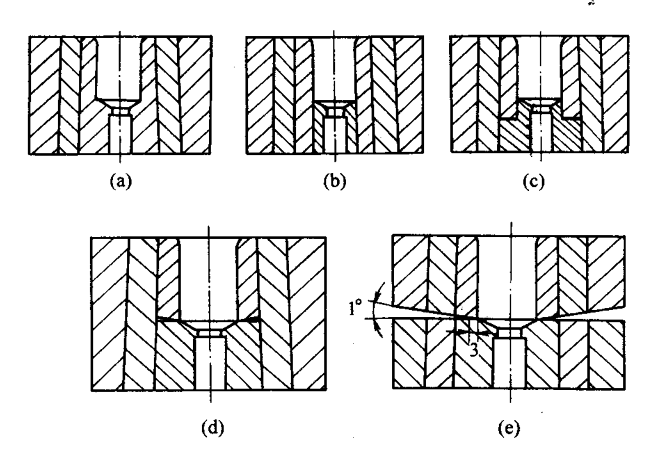


图 6.1-48 各种型式的正挤压凹模

内层凹模尺寸决定，见图 6.1-49 正挤压凹模。

凹模腔内径 D_d：　$D_d = (D_t - \Delta)^{+\delta_d}_{\ 0}$

式中，D_t 为零件头部名义直径。

工作带直径 d：　$d = (d_t - \Delta)^{+\delta_d}_{\ 0}$

式中，d_t 为零件杆部名义直径。

工作带长度 $g = 2\sim5$ mm

合理的凹模锥角　$\alpha = 60°\sim120°$

凹模腔高度　h = 坯料高度 + $R + r$ + (5～10) mm

工作带以下孔径后隙大小 $b = 0.1\sim0.5$ mm，并应光滑过渡，过渡处圆角半径 $R = 1\sim3$ mm，凹模工作带以下高度 $h_3 = 0.7D$。

(5) 热挤压模工作部分设计（表 6.1-11、图 6.1-50）

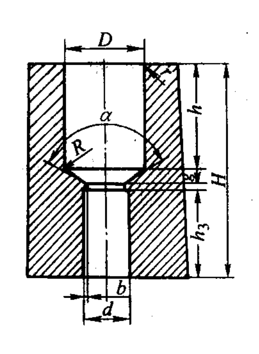
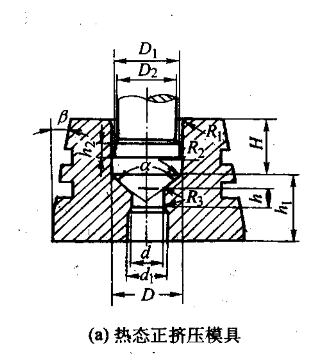
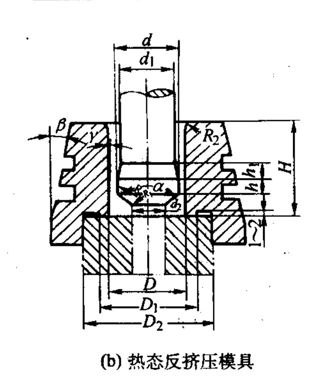


图 6.1-49 正挤压凹模



(a) 热态正挤压模具



(b) 热态反挤压模具

图 6.1-50 热挤压模工作部分结构尺寸

表 6.1-11 热挤压模工作部分尺寸

热态正挤压模具		热态反挤压模具	
尺寸	确定方法	尺寸	确定方法
D	$(1+\lambda)$ D_0（D_0—挤压件最大直径）	d	$(1+\lambda)$ d_0（d_0—挤压件最大直径）
λ	≤1.5%（冷缩率）	λ	≤1.5%（冷缩率）
D_1	$D-0.1$ mm	d_1	$d-$（1.0～2.0）mm
D_2	D_1-（1.0～2.0）mm	d_2	$0.5d$
d	$(1+\lambda)$ d_0（d_0—挤压件小端直径）	D	$(1+\lambda)$ D_0（D_0—挤压件外径）
D_1	$d+$（0.4～0.8）mm	D_1	$1.2D$
h	(0.5～1.0) d	D_2	(2.0～2.5) D
H_1	(1.0～1.5) d，但 $h_1 \geq$ (25～30) mm	H	H_0+R_2+（5～10）mm（H_0—毛坯高度）
H_2	10～15 mm	h	5～10 mm
R_1	2～5 mm	h_1	(1.5～2.0) h
R_2	1～2 mm	R_1、R	1～2 mm
R_3	1.5～2.5 mm	R_2	2～5 mm
α	90°～120°	α	120°
β	5°～10°	β	5°～10°
H	H_0+R_1+10 mm（H_0—毛坯高度）	γ	0°～0°30′

4 挤压实例

4.1 汽车活塞销冷挤压

汽车活塞销零件如图 6.1-51 所示。材料为 20 钢或 20Cr 钢。首先将活塞销零件图变成挤压件图。活塞销内孔（直径 ϕ14.6 mm）是自由公差，所以其精度要求可以由冷挤压工艺满足。

冷挤压中连皮的位置有两种方案：即将连皮放置在挤压件的底部（图 6.1-52）和中部（图 6.1-53）。

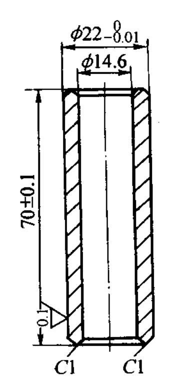


图 6.1-51 汽车活塞销（20Cr）

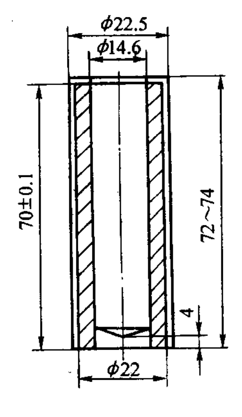


图 6.1-52 活塞销挤压件图的第一方案（不合理）

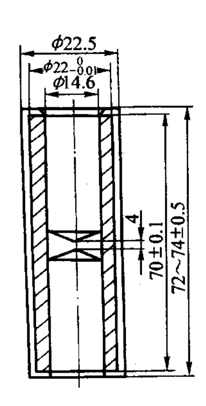


图 6.1-53 活塞销挤压件图的第二方案（合理）



当一次反挤压时，零件的反挤压的断面缩减率见图 6.1-52 所示：

$$\varepsilon_F = \frac{14.6^2}{22.5^2} \times 100\% = 42.1\%$$

这个断面缩减率对 20 钢和 20Cr 钢都是可行的，但这仅是从变形程度来看。如果从反挤压凸模的稳定性考虑，凸模的细长径比 $L/d > 3$，易产生纵向弯折，且挤压时不稳定，产生严重的壁厚差。因此该冷挤压方案是难以实现的。如果采用图 6.1-53 所示的第二方案，将连皮放在中间，采用上下两个反挤凸模，每个凸模长度可大大减小，保证了凸模工作时的稳定性。中间连皮机加工钻掉。为使连皮位置保持在中间，上下凸模的顶角通过反复试验，上凸模的顶角 $\alpha_1 = 162°$，下凸模的顶角 $\alpha_2 = 126°$，这样可以满意的控制金属向上、向下流动的均匀性。当采用卧式双向自动挤压机，两个凸模从两个方向以同等的速度挤压，连皮容易在中间，挤压质量更好。

近年来，为进一步改善活塞销使用寿命，希望取消中间连皮的钻孔加工，这样活塞销纤维切断可以避免。现采用二道次挤压即反挤制坯后再空心正挤，这样在二工序之间必须进行第二次软化处理及磷化、皂化处理，增加了辅助工序，提高了成本。但如果采用温冷复合成形工艺，第一道反挤制坯采用温挤压，然后缓冷余热软化处理，再经表面润滑处理，最后进行空心正挤可得到较经济合理的生产方法。

4.2 轴承套圈的温挤压

轴承套圈作为基础元件在机械制造业及其他具有转动的部位都有广泛应用。GCr15 轴承钢应用 100 多年来，大部分轴承套圈都应用该钢种。轴承钢冷挤压变形抗力极高、模具寿命低，故常选用温挤压成形，这样变形力低、不易产生过热、过烧、脱碳氧化等弊病，产品尺寸精度、内部质量都可与冷成形相媲美，因而广泛被采用。

轴承套圈温挤压成形方案见图 6.1-54 所示。反挤一次成形的Ⅰ方案不仅生产效率低而且反挤单位压力高；方案Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ均采用复合挤一次成形可以生产两个轴承套圈；方案Ⅴ一次成形阶梯反挤二个轴承圈，但挤压力偏高，凸模易断；方案Ⅵ采用反挤＋空心正挤二道次成形，同时生产二个轴承圈。下面就第二方案进行分析，见表 6.1-12 所示。

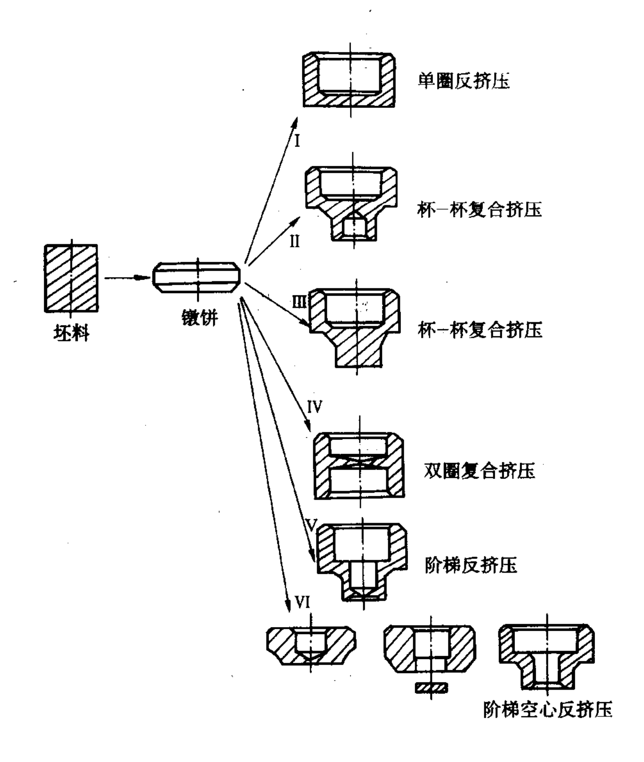


图 6.1-54 轴承圈温挤压成形方案

表 6.1-12 204 轴承温挤工艺过程说明

序号	名称	工序草图	设备	工艺说明
1	冷剪料	l, ϕ	100 t 压力机	材料：GCr15 热轧退火材料 1）$\phi 28$ $l = 30$ 2）$l/\phi = 1.06$ 3）144 g ± 1.5 g = 142.5 ~ 145.5 g 4）180 ~ 185HB 5）2 ~ 3 级退火组织
2	加热	680 ± 20℃	12 kW 箱式电炉	1）每炉装卸量 100 ~ 150 件 2）升温时间 15 ~ 20 min，保温 10 min，然后切断电源 3）每次从炉中取出 1 件锻造
3	镦饼	H, D	J31 – 160A 160T 压力机	1）$D = \phi 47.5 \pm 0.2$ $H = 10$ 2）$\varepsilon_r = 66\%$ 3）100HRB
4	加热	700 ± 20℃	12 kW 箱式电路	1）每炉装炉量 60 件 2）升温时间 12 ~ 15 min，保温 8 min，然后切断电源 3）每次从炉中取出 1 件锻造
5	润滑剂	油剂石墨或水剂石墨		刷涂模具或喷涂
6	塔形挤压成形	D, d_1, H, 10°, 5°, d_2, D_1	J31 – 400 400 t 压力机	1）$D = 47.4 \pm 0.4$ $d_1 = 39 - 0.4$ $H = 16.2 + 1.8$ 2）$D_1 = 28.4 + 0.4$ $d_2 = 19.2 - 0.4$ $h = 15 + 1.5$ 3）调整挤压冲头深度，到符合尺寸要求 4）严格掌握挤压温度



续表 6.1-13

序号	名称	工序草图	设备	工艺说明
7	内外套中间分离		J31－160B 160t 压力机	1）$D=47.4+0.4$ $d_1=39-0.4$ $H=16.2+1.8$ 2）壁厚差不大于 0.3，椭圆度 0.05 以下 3）利用挤压后余热分离 600～550℃
8	切料芯		J31－160A 160t 压力机	1）$D_1=28.4+0.4$ $d_2=19.2-0.4$ $h=15+1.5$ 2）壁厚差不大于 0.4 椭圆度 0.05 以下 3）切底利用挤压后余热 500°以上为好 4）空冷
9	检查			1）尺寸精度及几何精度检查 2）98～101HBB 3）2～3 级退火组织

编写：张质良（上海交通大学）



第2章　冷　镦　锻

1　冷镦工艺

冷镦是指常温下金属线材在自动冷镦机上进行镦挤成形的一种加工方法：冷镦工艺多用于铆钉、螺钉、螺栓、螺母、小轴和空心套等零件的头部成形或整体成形。

冷镦模具设计的合理与否，是决定模具的使用寿命和制件质量好坏的主要条件之一。

（1）冷镦模具的工作特点和要求

1）作用在模具上的单位压力较大，有时可达到 2 500～3 000 MPa，因此，要求模具必须具有足够的强度。

2）模具工作表面温度高。当模具连续工作时，模具工作表面温度就要上升，有时瞬时温度上升到 300℃以上。

3）模具工作表面所承受的摩擦载荷大。由于变形时金属与模具的接触面产生很大的摩擦，所以模具的工作表面承受很大的摩擦载荷，故要求模具的工作表面要有良好的耐磨性和耐黏附性。

4）模具工作部分应避免出现尖角或退刀槽，尽量采用光滑的圆角过渡。对承受内压力较大的凹模，在结构上往往采用预应力圈，以防凹模过量的变形与开裂。为了防止因模具工作部分形状突变而引起的应力集中，往往将凸凹模作成组合结构。

5）冷镦模具材料要求具有足够的强度和硬度，较好的韧性，较大的疲劳强度，较好的热处理淬透性和抗回火稳定性，热处理变形小，以及良好的机械加工性能等。

（2）冷镦模具的一般设计程序

1）确定成形方式和变形工序，主要考虑冷镦材料的性质，坯料的变形和尺寸要求，变形程度大小，生产批量的大小等。

2）计算单位压力和总载荷，考虑模具许用的单位压力和冷镦设备的选择。

3）确定模具工作部分的型式，采用整体式还是组合式。

4）确定模具工作部分基本尺寸。

5）对模具进行强度核算。

6）确定模具各部分尺寸。

7）绘制模具图。

1.1　冷镦工艺过程和力的计算

通常冷镦件按其形状可分为实心零件和空心零件两大类。其制造零件的直径最大可达 38 mm，长度可达 200 mm，在特殊的自动冷镦机上可达 400 mm，但最广泛冷镦加工的零件直径是 3～16 mm。

自动冷镦机的生产率非常高，可以达到每分钟生产 400 件左右，小零件甚至可以达到 800 件/min，一般不产生飞边。用于冷镦的原材料一般是经过冷拔的圆截面线材，其公差见表 6.2-1。

表 6.2-1　冷镦用冷拔线材的尺寸公差　mm

线材外径	公差	圆度
<9.00	+0 -0.03	<0.015
≥9.00～18.00	+0 -0.04	<0.02
≥18.00	+0 -0.05	<0.025

冷镦工艺过程的确定要按照零件材料的塑性（许用镦粗率）、零件结构形状、尺寸精度和避免产生缺陷等因素考虑。

（1）镦粗率的计算

镦粗时轴向变形程度的计算公式如下

$$E=\frac{H'_0-H'_k}{H'_0}\times 100\%$$

式中，E 为镦粗率，%；H'_0 为毛坯镦粗变形高度，mm；H'_k 为工件镦粗部分的最后高度，mm。

毛坯镦粗变形高度 H'_0 不应包括在模膛内不发生镦粗变形的高度，如图 6.2-1 所示。

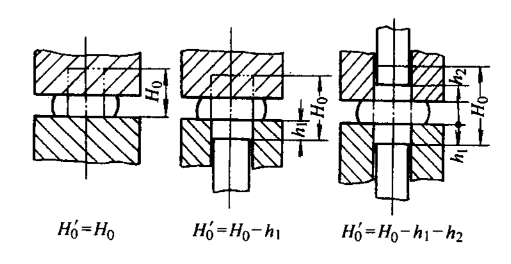


图 6.2-1　镦粗变形高度的确定

H_0—毛坯的总高度；h_1、h_2—毛坯在上下模膛内不发生镦粗变形的高度

从图 6.2-1 可知，镦粗变形高度 H'_0 应等于毛坯总高度减去毛坯在上、下模膛内断面不发生扩张部分的高度。

为了使变形不致发生轴向弯曲，一次变形时，一般控制毛坯最大变形高度 H'_{0max} 小于或等于毛坯直径 d_0 的 2.3 倍，即 $H'_{0max}\leqslant 2.3d_0$。

如果毛坯在模膛中安装时自由伸出量较小，或采用防止轴向弯曲的定位套时，则最大变形高度可以适当加大。

冷镦的许用变形程度取决于材料的塑性、硬度、模具条件和润滑状态等。冷镦许用变形程度就是在冷镦成形时，允许取用镦粗率的最大界限值。许用变形程度与极限变形程度有所不同。冷镦时的极限变形程度，就是在镦粗变形过程中，材料表面开始出现裂纹时的极限镦粗率。为了保证成形的可靠性，许用变形程度必须小于极限变形程度。极限镦粗率是将一定直径和一定高度的材料，经过软化处理后通过自由镦粗的实验获得。表 6.2-2 列出部分钢材的极限镦粗率 E_{lim} 和许用镦粗率 E_p。

表 6.2-2　钢材的极限镦粗率和许用镦粗率　%

材料	E_{lim}	E_p
10	80	68
08F　10F	90	72
20	76	65
35	73	60
15Cr	78	60
40Cr	74	55
30CrMnSiA	87	65
65Mn	50	40
GCr15	60	45
1Cr18Ni9Ti	90	76

当变形程度超过表中所列出的许用值时，就应采用多次成形。并在两道变形工序之间进行中间退火，以消除冷作硬化现象。

(2) 冲击次数的确定

根据许用变形程度和极限变形程度，考虑顶镦成形时不至产生开裂、弯曲、折叠、夹灰等缺陷，顶镦成形所必须的冲击次数，一般按线材未夹持部分的自由高度 l 与其直径 d_m 之比确定，如图 6.2-2 所示。

当 $l/d_m \leqslant 2.8$ 时，需要进行一次冲击；

当 $l/d_m = 3 \sim 5.5$ 时，需要进行二次冲击；

当 $l/d_m = 5.6 \sim 8$ 时，需要进行三次冲击。

每次冲击后缩短的尺寸情况如下：

第一次冲击后缩短到（75% ~ 80%）l；

第二次冲击后缩短到（40% ~ 55%）l；

第三次冲击后缩短到工件的最后高度 h_k。

此外，冲击次数还取决于头部尺寸 D 与 h_k 的比值，如果径向尺寸 D 较大，而厚度 h_k 又较小，这时必须考虑增加一次冲击次数，以镦粗直径缩短高度。

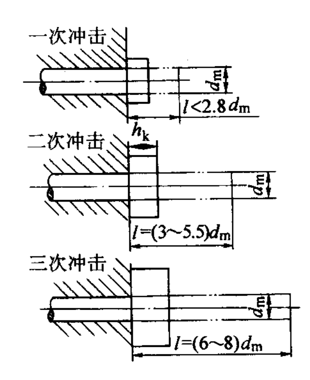


图 6.2-2　冲击次数的确定

冷镦螺钉头部及六角螺母所需毛坯长度的计算见表 6.2-3 及表 6.2-4。

表 6.2-3　冷镦螺钉头部所需毛坯长度的计算

名称	头部形状	毛坯长度的计算公式
半圆头		$L=\dfrac{4h^2}{d_m^2}\left(R-\dfrac{h}{3}\right)$
沉头		$L=\dfrac{h}{3d_m^2}(D^2+Dd+d^2)$
半沉头		$L=\dfrac{4h}{d_m^2}\left(\dfrac{D^2}{8}+\dfrac{h^2}{6}\right)+\dfrac{6}{3d_m^2}(D^2+Dd+d^2)$
平顶圆柱头		$L=\dfrac{D^2}{d_m^2}h$
六角头		$L=1.33\dfrac{S^2}{d_m^2}h$
四方头		$L=1.27\dfrac{S^2}{d_m^2}h$

表 6.2-4　冷镦六角螺母毛坯尺寸的计算

名称	未冲孔形状	毛坯直径 d		毛坯长度 L
六角螺母		< M6	$d=(1.1\sim1.2)\ d_n$	$L=\dfrac{4V}{\pi d^2}$
		M8 ~ M24	$d=(1.0\sim1.1)\ d_n$	

注：d_n 为螺母的公称直径；V 为未冲孔螺母毛坯的体积。

(3) 冷镦变形力的计算

正确地确定冷镦变形力的大小，对合理地选用设备吨位，正确的进行模具结构设计等都是十分重要的。

影响冷镦力的主要因素有变形材料的力学性能、零件的尺寸、形状和变形程度、冷镦变形方式、模具结构及润滑条件等因素。

$$F=\beta\,\sigma_s D^2 \qquad \text{(a)}$$

式中，F 为总的顶镦力，N；σ_s 为冷镦前材料的屈服点，MPa；D 为冷镦头部的最大直径，mm；β 为系数，对一般低碳钢，当变形程度在 50% ~ 60% 时，其值在 5 ~ 6 范围内，即式 (a) 可简化为

$$F=(5\sim6)\,\sigma_s D^2$$

若变形条件不属于上述情况时，β 值可通过计算求得

$$\beta=CZ\left(1+\frac{\mu D}{3h_k}\right)\frac{\pi}{4}=0.785CZ\left(1+\frac{\mu D}{3h_k}\right)$$

代入式 (a)，即可计算出冷镦力

$$F=0.785CZ\sigma_s\left(1+\frac{\mu D}{3h_k}\right)D^2$$

式中，C 为冷作硬化系数；Z 为形状充满系数，其数值可由图 6.2-3 查出；μ 为外摩擦因数，根据润滑条件不同而不同，一般在 0.08 ~ 0.15 范围内变动；D 为冷镦及零件头部最大直径，mm；h_k 为冷镦及零件头部最大高度，mm。

冷作硬化系数 C 值即冷镦前后的屈服点比

$$C=\frac{\sigma'_s}{\sigma_s}$$

式中，σ'_s 为加工硬化后的屈服点（MPa），按金属压缩时的硬化曲线（图 6.2-4）查得；σ_s 为冷镦前钢材的屈服点（MPa）。

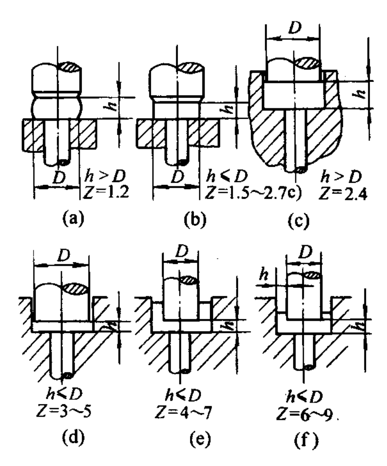


图 6.2-3 形状充满系数 Z

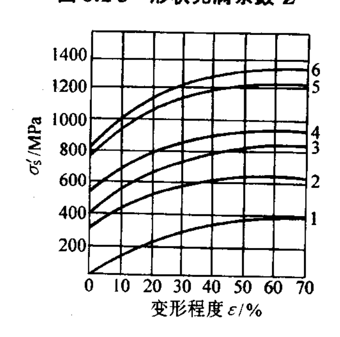


图 6.2-4 金属压缩时的硬化曲线
1—铜 2—10 钢 3—35 钢
4—45 钢 5—40Cr 6—40CrNiMoA

1.2 典型零件冷镦工艺

冷镦工艺由下列主要工序组成：切料、初镦、二镦、终镦、镦球、切边、冲孔等，几种主要冷镦零件的工艺简单地列于表 6.2-5。

表 6.2-5 典型零件冷镦工艺

序号	名称	成形工序
1	六角头螺栓	切料 初镦 终镦 切边
2	凸缘螺栓	切料 初镦 二镦 终镦 切边
3	钢球	切料 镦球 光球
4	内六角螺钉	切料 初镦 二镦 镦六角

续表 6.2-5

序号	名称	成形工序
5	半圆头方颈螺栓	切料 初镦 终镦 切边
6	连杆螺栓	切料 整形 初镦 二镦 终镦
7	六角螺母	切料 镦球 镦六角 冲孔
8	阀门弹簧座圈	切料 整形 （退火） 镦球 冲孔 （退火磷化） 终镦

2 自动冷镦机模具

2.1 冷镦模具的分类

冷镦模具分为冷镦杆状零件和冷镦螺母零件两大类，另外还有通用的坯料和制造螺纹用工具。

冷镦杆状零件的模具主要用来生产铆钉、螺钉、螺栓、小轴等零件，其模具的主要品种有初镦冲头组合（有时还可以有二镦冲头组合）、终镦冲头组合、镦粗凹模组合、切边冲头组合、切边凹模组合等。

冷镦螺母类零件的模具主要用来生产螺母、火花塞、弹簧座圈等空心零件。一般常用的模具部件品种有：整形冲头组合、整形凹模组合、镦球冲头组合、镦球凹模组合、镦六角冲头组合、镦六角凹模组合、冲孔冲头组合、冲孔凹模组合。

为了便于加工，节约模具材料，提高模具寿命等因素，冲头及凹模都做成组合形式。

冷镦模具主要品种及其零件名称材料。热处理硬度要求见表 6.2-6，各组合的零件数随结构不同可以简化。

表 6.2-6 冷镦模具分类及名称

零件类别	名称	组成	材料	硬度	用途
杆类	初镦冲头组合	初镦冲头 冲头套 冲头垫块 冲头后垫	T10 5CrNiMo T10 T10	58～60HRC 44～48HRC 50～55HRC 58～62HRC	起过渡作用，形成所需金属流线
	终镦冲头组合	终镦冲头 冲头套 冲头垫块 冲头后垫	7Cr7Mo3V2Si 5CrNiMo	见冲头设计 44～48HRC	镦出杆状零件头部几何形状和尺寸
	凹模组合	凹模 凹模垫块 顶料杆 凹模套 凹模后垫 顶料杆套	YG20C，5CrNiMo Cr12MoV 65Mn，9SiCr 5CrNiMo 或 40Cr T10	44～48HRC 60～62HRC 58～60HRC 44～48HRC 50～55HRC	镦出杆状零件的杆部颈部、头部或部分头部
	切边冲头组合	切边冲头（切边模） 切边冲头垫块 切边冲头套 切边冲头后垫	Cr12MoV 或 7Cr7Mo3V2Si T10 65Mn T10	58～60HRC 50～55HRC 40～45HRC 50～55HRC	切制零件所需形状和尺寸
	切边凹模组合	切边凹模 切边凹模模套 切边凹模垫块 顶料杆 切边凹模后垫 顶料杆套	T10 T10	58～60HRC 45～50HRC	

续表 6.2-6

零件类别	名称	组成	材料	硬度	用途
螺母类	整形冲头组合	整形冲头 整形冲头模套 整形冲头垫块 整形冲头后垫	68Si2MnA T10 T10 T10	56~60HRC 50~55HRC 58~62HRC 58~62HRC	将切下的料两端镦平并倒角
	整形凹模组合	整形凹模 整形推料杆 整形凹模模套 整形凹模垫块 整形凹模弹簧座 整形推料杆座 整形凹模后垫	T10 9SiCr T10 T10 T10 T10 T10	56~60HRC 54~58HRC 50~55HRC 58~62HRC 45~50HRC 58~62HRC 58~62HRC	
	镦球冲模组合	镦球冲模 镦球冲模推杆（镦球推杆） 镦球冲模推杆座 镦球冲模垫块	GCr15 或 T10 9SiCr T10 T10	58~62HRC 54~58HRC 58~62HRC 58~62HRC	将制件镦成端面凹心的桶形
	镦球凹模组合	镦球凹模 镦球凹模推杆 镦球凹模模套 镦球凹模垫块 镦球凹模弹簧座 镦球凹模推杆座 镦球凹模推杆后垫 镦球凹模后垫	T10 T10 T10 T10 45 T10 T10 T10	58~62HRC 58~62HRC 50~58HRC 58~62HRC 40~45HRC 58~62HRC 58~62HRC 58~62HRC	
	镦六角冲头组合	镦六角冲头 镦六角冲头模套 镦六角冲头垫块 镦六角冲头模后垫	Cr12MoV 或 7Cr7Mo3V2Si T10 T10 T10	58~62HRC 50~55HRC 58~62HRC 58~62HRC	六角成形
	镦六角凹模组合	镦六角凹模 镦六角下冲头 镦六角凹模套 镦六角下冲头紧固螺母 镦六角下冲头套 镦六角凹模弹簧座	YG20C Cr12MoV 或 7Cr7Mo3V2Si T10 45 T10 45	 58~62HRC 50~55HRC 28~32HRC 55~60HRC 40~45HRC	
	冲孔冲头组合	冲孔冲头 冲孔冲头模套 冲孔冲头垫块 冲孔冲头模后垫	W18Cr4 或 7Cr7Mo3V2Si T10 T10 T10	58~62HRC 50~55HRC 58~62HRC 58~62HRC	冲掉废料
	冲孔凹模组合	冲孔凹模 冲孔凹模套 冲孔凹模垫块 冲孔凹模后垫	60Si2MnA T10 T10 T10	58~62HRC 50~55HRC 58~62HRC 58~62HRC	
通用类	切料刀组合	切料刀 切料刀压板	YG20，GCr15，T10 65Mn	58~62HRC 40~45HRC 50~55HRC	切断线材
	切料模组合	切料模 切料模垫块 切料模模套 切料模后垫	W18Cr4V，7Cr7Mo3V2Si YG20C T10 T10 T10	58~62HRC 50~55HRC 50~55HRC 50~55HRC	切断线材
	滚丝轮		Cr12MoV 或 9SiCr	59~62HRC	滚压螺纹
	搓丝板		Cr12MoV 或 9SiCr	59~62HRC	

注：1. 根据冲击次数，除初镦冲头外还可有二镦冲头等。
2. 根据凹模形状，结构，用途，凹模还可分为多种，见凹模设计。



2.2 自动冷镦机模具结构

用于双击或多工位自动冷镦机的模具，其凹模、冲头座尺寸按冷镦机型号已标准化，冷镦螺钉、六角和内六角螺栓、螺母等标准紧固件的模具结构示于图6.2-5～图6.2-10，上述模具的冲头与凹模虽然在轴线方向是组合的，但在圆周方向是整体的，所以仍然称为整体模，用开合模自动冷镦机时凹模本身是横向可以开合的，开合凹模用于加工长杆的零件和特殊零件，其加工方式为：材料的供给与镦锻的动作同步，通过安装在切料刀滑块上的切料刀将材料切断，并沿与

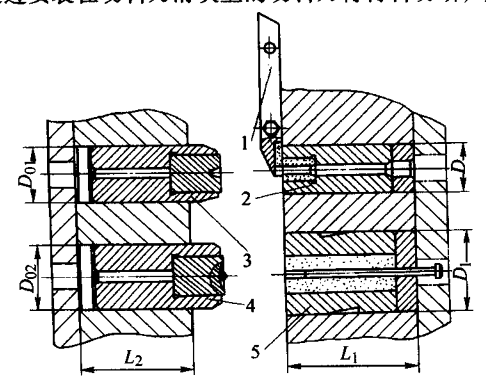


图 6.2-5 双击整模自动冷镦机冷镦螺钉模具

1—切料刀组合；2—切料模组合；3—初镦冲头组合；4—终镦冲头组合；5—镦锻凹模组合

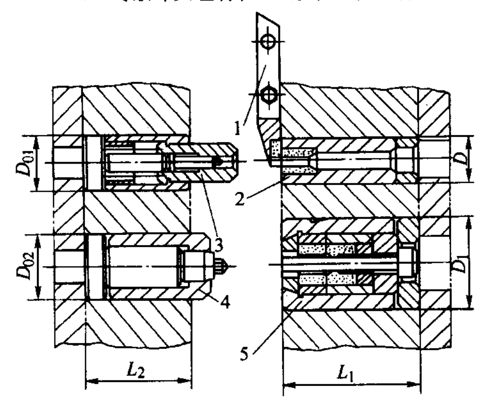


图 6.2-6 双击整模自动冷镦机冷镦内六角螺钉模具

1—切料刀组合；2—切料模组合；3—初镦冲头组合；4—镦六角冲头组合；5—镦六角凹模组合

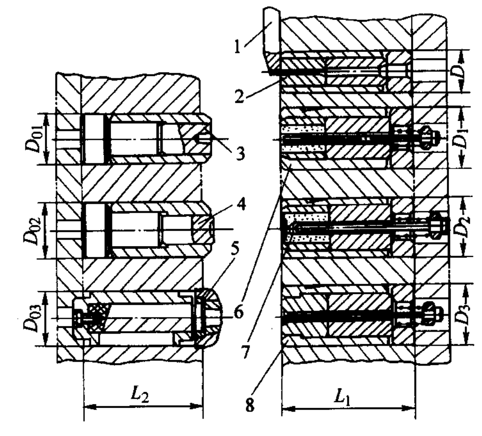


图 6.2-7 多工位自动冷镦机冷镦六角螺栓模具

1—切料刀；2—切料模组合；3—初镦冲头组合；4—终镦冲头组合；5—切边冲头组合；6—初镦凹模组合；7—终镦凹模组合；8—切边凹模组合

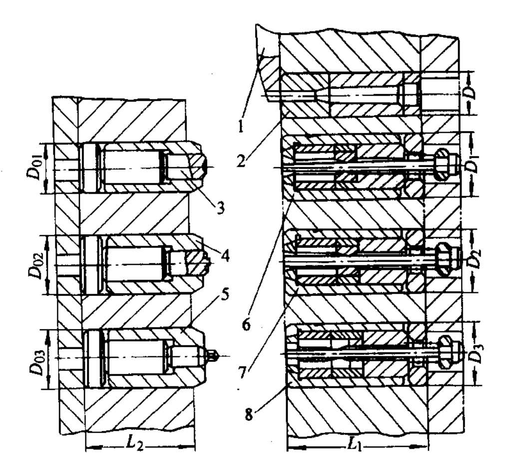


图 6.2-8 多工位自动冷镦机冷镦内六角螺钉模具

1—切料刀；2—切料模组合；3—初镦冲头组合；4—成型冲头组合；5—内六角冲头组合；6—初镦凹模组合；7—成形凹模组合；8—镦六角凹模组合

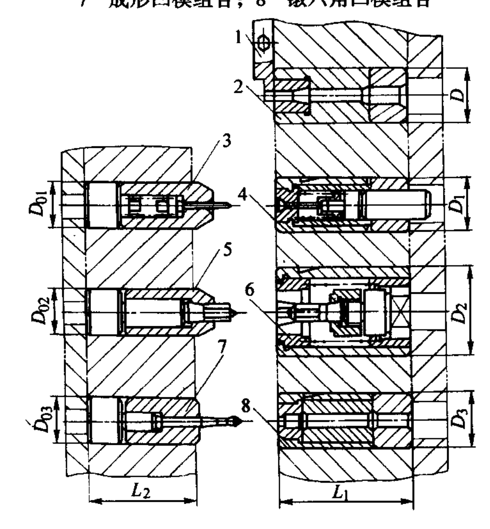


图 6.2-9 三工位螺母冷镦机模具

1—切料刀组合；2—切料模组合；3—镦球冲头组合；4—镦球凹模组合；5—镦六角冲头组合；6—镦六角凹模组合；7—冲孔冲头组合；8—冲孔凹模组合

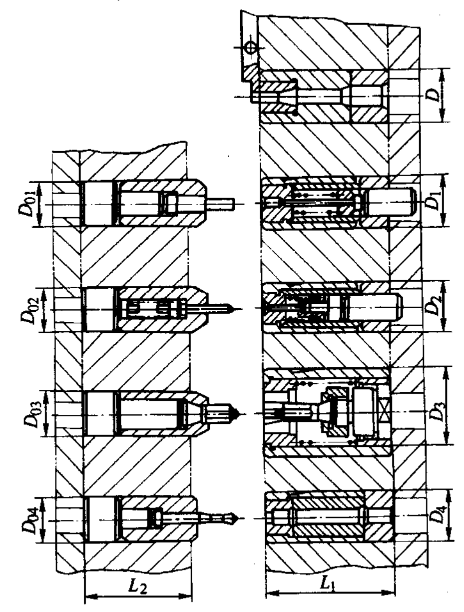


图 6.2-10 四工位螺母冷镦机模具



镦锻方向垂直的方向送到凹模前方，由初镦或终镦冲头压入开合凹模内，此时坯料被可分凹模夹紧固定，终镦完毕时，可分凹模重新张开，成品被顶杆顶出。其加工过程示于图6.2-11。

2.3 自动冷镦机模膛尺寸

（1）双击整模自动冷镦机

双击整模自动冷镦机模膛尺寸见表6.2-7。

（2）多工位自动冷镦机

多工位自动冷镦机模膛尺寸见表6.2-8。

（3）三工位螺母冷镦机

三工位螺母冷镦机模膛尺寸见表6.2-9。

（4）四工位螺母冷镦机

四工位螺母冷镦机模膛尺寸见表6.2-10。

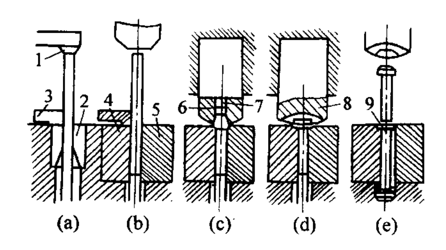


图6.2-11 采用可分凹模的冷镦工艺

（a）送料及切断 （b）材料（切断后）送至可分凹模前 （c）材料插入凹模内可分凹模夹紧第1次镦锻 （d）第2次镦锻 （e）凹模开放，顶出产品

1—长度定位挡料器；2—切料模；3—切料刀；4—固定可分凹模；5—可动可分凹模；6—初镦冲头；7—销；8—终镦冲头；9—顶出杆

表6.2-7 双击整模自动冷镦机模膛尺寸

mm

制件最大螺纹规格			M2.5	M4	M6	M8	M12	M16
切料模	直径 D		14	18	22	35	45	60
	长度 L_1		35	50	80	110	150	200
镦锻凹模	直径 D		25	35	50	60	80	100
	长度 L_1		35	50	80	110	150	200
冲头	直径	初镦 D_{01}	16	22	30	35	55	70
		终镦 D_{02}	22	25	35	50	65	80
	长度 L_2		30	40	50	60	85	110

表6.2-8 多工位自动冷镦机模膛尺寸

mm

制件最大螺纹规格			M6	M8	M12	M16	M20
切料模	直径 D		22	35	45	60	70
	长度 L_1		80	110	150	200	250
镦锻凹模	直径 $D_1 \sim D_3$		50	60	80	100	120
	长度 L_1		80	110	150	200	250
冲头	直径	初镦工位 D_{01}	30	35	55	70	80
		其余工位 $D_{01} \sim D_{03}$	35	50	65	80	100
	长度 L_2		70	100	140	170	200

表6.2-9 三工位螺母冷镦机模膛尺寸

mm

制件最大螺纹规格			M4	M6	M8	M12	M16	M20
切料模	直径 D		25	30	45	60	70	90
	长度 L_1		60	80	100	150	180	200
镦锻凹模	直径	镦球工位 D_1	25	30	45	60	70	90
		镦六角工位 D_2	45	60	75	100	130	160
		冲孔工位 D_3	25	30	45	60	70	90
	长度 L_1		60	80	100	150	180	200
冲头	直径 $D_{01} \sim D_{03}$		25	30	40	50	60	70
	长度 L_2		60	80	100	120	140	160

表6.2-10 四工位螺母冷镦机模膛尺寸

mm

制件最大螺纹规格		M4	M6	M8	M12	M16	M20
切料模	直径 D	25	30	45	60	70	90
	长度 L_1	60	80	100	150	180	200



续表 6.2-10

制件最大螺纹规格			M4	M6	M8	M12	M16	M20
镦锻凹模	直径	镦平工位 D_1	25	30	45	60	70	90
		镦球工位 D_2	25	30	45	60	70	90
		镦六角工位 D_3	45	60	75	100	130	160
		冲孔工位 D_4	25	30	45	60	70	90
	长度 L_1		60	80	100	150	180	200
冲头	直径 $D_{01} \sim D_{04}$		25	30	40	50	60	70
	长度 L_2		60	80	100	120	140	160

3 杆状零件冷镦模具设计

在杆状零件冷镦凹模和冲头的设计中，对其进行正确计算，规定必要的加工精度和表面粗糙度，是保证制件质量和模具寿命的重要条件。

制件的形状和尺寸是由凹模工作腔，终锻冲头工作腔以及在镦制结束时冲头和凹模之间的间隙 n 决定。

进行工具设计时，如果制件图样上的技术条件未做特殊规定，间隙不应规定得过小。一般可按制件杆颈 d 的大小，取下列数值：

$d = 3 \sim 7$ mm　　$n = 0.5$ mm

$d = 7 \sim 12$ mm　　$n = 1.0$ mm

$d \geqslant 12$ mm　　$n = 1.5$ mm

因为减小间隙量会使冷镦力增加。如果制件的头部需切边成形，间隙 n 应当等于头部高度的 1/3。

由于在凹模型腔内成形要比在冲头工作腔内成形差，设计模具时应合理确定分模面。

在凹模型腔内冷镦的制件没有拔模斜度。但是当冲头或凹模没有顶料机构时，就必须设有拔模斜度，以避免制件嵌留在模具中，造成模具的损坏及冷镦机不必要的停车。

3.1 冲头设计

冲头是与冷镦凹模有密切关系的模具，冲头可分初镦冲头（包括多次冲击成形时，起预成形作用的各种冲头）和终镦冲头两种。

(1) 初镦冲头

当冷镦高精度制件，经一次冲击，头部和杆部达不到要求的同心度，不能得到所需尺寸精确的头部，或冷镦复杂零件头部时，均需使用初镦冲头，它主要应用于双击、三击和多工位冷镦机。

1) 初镦冲头组合

① 固定式初镦冲头如图 6.2-12 所示。

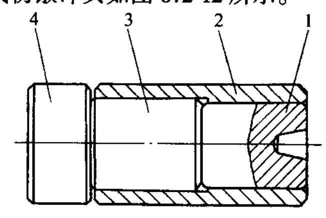


图 6.2-12 固定式初镦冲头

1—初镦冲头；2—冲头套；3—冲头垫块；4—冲头后垫

② 弹性顶杆初镦冲头如图 6.2-13 所示。顶杆 1 由弹簧 5 推出，弹簧 5 由冲头后垫 4 支撑，冷镦时，顶杆 1 由中间杆 2 和冲头后垫 4 支撑。在确定弹簧长度时，要保证弹簧 5 处于压缩状态而不失去弹性。适用于镦制短毛坯制件。

③ 滑动式初镦冲头如图 6.2-14 所示。冲头在弹簧作用下，处在前方，由切向销限制其位置，第二个弹簧使中间杆亦处于最前位置。毛坯进入镦制工位后，在凹模外的其余部分被冲头包围，机床滑块继续前进时，毛坯在初镦冲头内镦出锥形。这种结构可以镦制较大体积的头部和更好地控制金属流动。

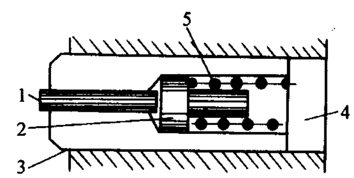


图 6.2-13 带弹性顶杆初镦冲头

1—冲头顶杆；2—中间杆；3—初镦冲头；4—冲头后垫；5—弹簧

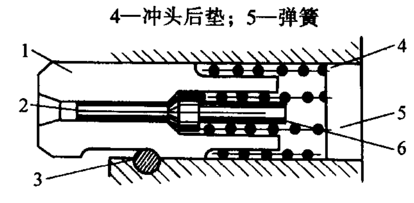


图 6.2-14 滑动式初镦冲头

1—初镦冲头；2—冲头顶杆；3—切向销；4—弹簧；5—冲头后垫；6—中间杆

2) 初镦冲头尺寸（见图 6.2-15）。设计锥角 α 时必须考虑下列两方面的因素。

① 要使金属的变形起到逐步过渡的作用。

② 镦出的工件要能顺利地从型腔中脱出。一般取锥角 $\alpha = 7° \sim 8°30'$。

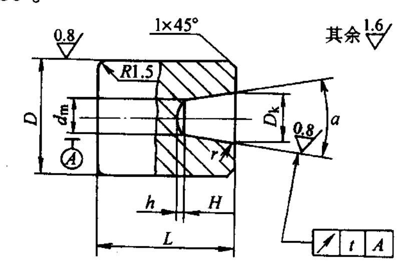


图 6.2-15 初镦冲头尺寸

锥形腔各部位的尺寸，列于表 6.2-11。

表 6.2-11 锥形腔的尺寸

锥形腔部位	尺寸
锥形腔大端口直径 D_k	$D_k = d_m + 2\ (H - h)\ \tan\frac{\alpha}{2}$
锥形腔底部直径 d_m	$d_m = d_0$
锥形腔深度 H	$H = 0.6L_t$
锥形腔锥角 α	$\alpha = 7° \sim 8°30'$
锥形腔底部 h 的尺寸	$h = 0.3 \sim 1$ mm

注：d_0 为所用毛坯材料的直径，mm；L 为镦粗工件头部所需要的线材长度，mm。



用此冲头冷镦时，冲头与凹模之间的许可间隙取模腔深度的6%～10%。

3）冷镦复杂零件的初镦冲头模腔。冷镦复杂零件的初镦冲头模腔见表6.2-12。

（2）终镦冲头

终镦冲头用于使制件头部达到所要求的形状和尺寸。

表6.2-12　复杂零件的初镦冲头模腔

制件名称材料和草图	预镦冲模工作部分草图	冷镦特点
接头10钢（16.4）	（0.5，ϕ7.15，ϕ8，90°，40°，5，8，2，5）	镦头和杆部缩径同时进行（杆的断面为方形）
螺栓15钢（ϕ11.78，ϕ19.8，80.2）	（R12.7，$15^{+0.2}_{0}$，$\phi 11.6^{+0.03}_{0}$，$\phi 16.4^{+0.1}_{0}$，R1，$\phi 11.65^{+0.04}_{0}$，$8.3^{+0.1}_{0}$）	零件的中间部分镦厚在整模自动冷镦机上进行
拉力调节螺钉15钢	（2，ϕ4.37，ϕ7，ϕ4.37，ϕ4.37，ϕ7.4，3.6）	杆的相对长度 $\psi=\frac{h}{d}=4$ 的球形头部的镦锻
钢钉10钢（ϕ8.3，M，ϕ14.5，21）	（ϕ9.8，ϕ7.8，7，4）	带有单面斜口（斜面）的颈部冷镦

1）终镦冲头组合如图6.2-16所示。终镦冲头形状，根据产品形状设计，如图6.2-17～图6.2-22所示。

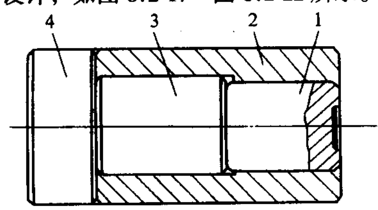


图6.2-16　终镦冲头组合

1—终镦冲头；2—冲头套；3—冲头垫块；4—冲头后垫

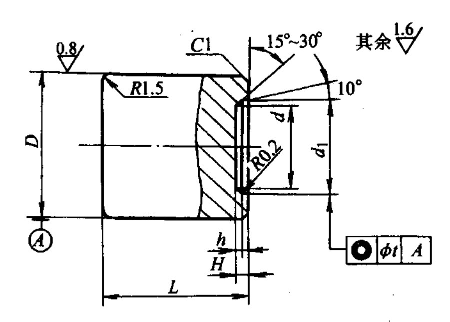


图6.2-17　六角头螺栓冲头

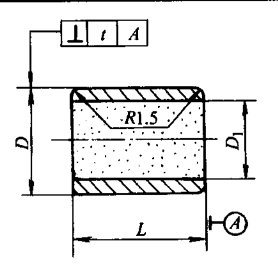


图6.2-18　沉头、平头制件冲头

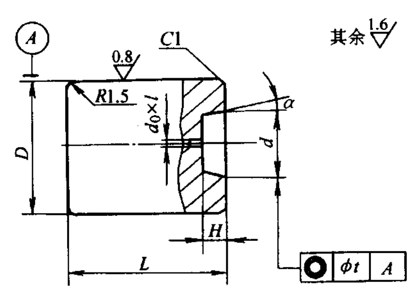


图6.2-19　镦圆柱头圆锥头冲头

小气孔直径：$d=1\sim2$ mm

小气孔深度：$h=2\sim3$ mm

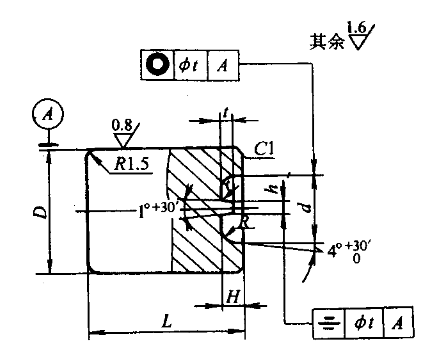


图 6.2-20 镦一字槽冲头

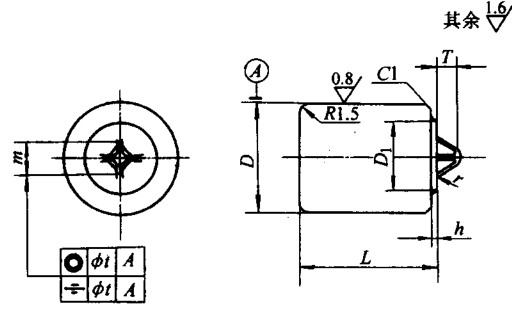


图 6.2-21 镦十字槽冲头

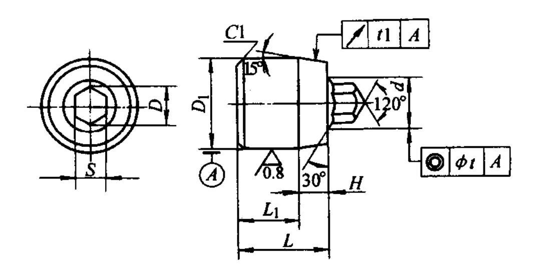


图 6.2-22 镦内六角冲头

2) 终镦冲头尺寸。终镦冲头（图 6.2-17～图 6.2-22）直径和长度的标准值见表 6.2-13。

冲头工作部分尺寸按制件头部要求的形状和尺寸制造。

表 6.2-13 终镦冲头尺寸 mm

编号	D	L	适用范围
1	12	14	≤5
2	16	18	≤8
3	20	24	≤12
4	28	34	≤16
5	32	38	≤18
6	38	45	≤23
7	48	58	≤32

3.2 凹模设计

根据不同的零件和冷镦工艺，零件的杆部、颈部、头部或部分头部均可在凹模内成形。

(1) 冷镦凹模的主要型式及结构

1) 冷镦凹模的主要型式列于表 6.2-14。可分凹模是以每两个为一组。凹模的型孔处于接合面上。因此要求接合面良好，否则镦出的工件中间有印痕。目前很少使用这种型式的凹模。

圆柱形凹模主要有四种结构型式，使用极为广泛。所以下面只对圆柱型凹模的结构设计做一介绍。

整体结构的凹模强度较差，使用寿命较短。一般在生产批量不大，单位压力较小的情况下采用。

组合结构的凹模，可以根据凹模的受力状态采取不同的组合方式，并便于采用硬质合金镶块。纵向组合式可以对凹模镶块施加预压应力，以抵消变形抗力对凹模所产生拉应力的影响。横向剖分的组合结构可以减少或消除应力集中的现象。联合组装式结构综合了上述两种组合结构的优点。所以组合结构的凹模受力情况良好，强度较高，使用寿命较长。适用于生产批量大的情况。但组合结构的凹模加工面较多，并且要求较高，因此制造上比整体结构的麻烦，成本较高。

表 6.2-14 冷镦机凹模的型式

凹模型式		主要说明	参考图号
开合式		由两个四角形或八角形模块构成	图 6.2-23
圆柱形	整体式	凹模用钢制成一个整体结构	图 6.2-24a
	纵向组合式	凹模由镶块与预应力圈组合而成，有钢制模块和硬质合金镶块	图 6.2-24b
	横向剖分式	凹模从型腔的过渡处横向剖分	图 6.2-24c
	联合组装式	凹模采取纵向组合和横向剖分联合组装而成	图 6.2-24d

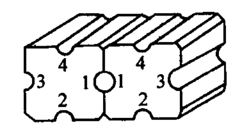


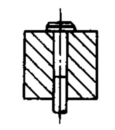
图 6.2-23 可分凹模

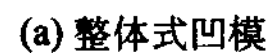
2) 冷镦凹模的型腔结构。按加工零件的形状和部位的不同，现将通常采用的几种型腔结构列入表 6.2-15。

图 6.2-25 所示为几种镦头凹模的常用型腔结构形式。现将图中各主要部位的设计要点说明如下。

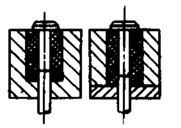
图 6.2-25a 为圆角形。圆角 R 在工件容许的条件下越大越好，最小不能小于 0.3 mm。

图 6.2-25b 为带座面形。座面各过渡部位应采用 R 圆弧连接。θ 角一般取 5°左右。

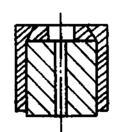


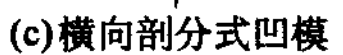


(a) 整体式凹模

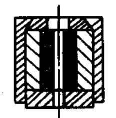


(b) 纵向组合式凹模





(c) 横向剖分式凹模



(d) 联合组装式凹模

图 6.2-24 圆柱形凹模的几种结构型式

表 6.2-15　冷镦凹模常用型腔的结构形式

结构型式		主要应用场合	参考图号
镦头型腔	圆角形	头部自由镦粗或半圆头螺钉镦头	图 6.2-25a
	带座面形	带座外六角螺栓的镦头	图 6.2-25b
	碟形	沉头与半沉头螺钉的镦头	图 6.2-25c
镦头型腔	方台孔形	四角头与六角头螺钉的镦头	图 6.2-25d
	圆台孔型	圆柱平头与圆柱内六角头螺钉的镦头	图 6.2-25e
	圆合锥底形	多用于在中间工序冷镦鼓形球	图 6.2-25f
缩梗型腔	缩径形	用于缩小滚压螺纹部分的直径	图 6.2-26a
	正挤压形	将较粗棒料挤出较细的轴径	图 6.2-26b、c
锥角形倒角腔		用于轴端倒角	图 6.2-27

图 6.2-25c 为碟形。R 在工件允许的条件下取值越大越好。

图 6.2-25d 为方台孔形。一般作成横向剖分的结构形式。方孔应有 $\alpha = 0°36' \sim 1°$的斜角，角部应作成圆角。必要时在角底打一横向小排气孔。

图 6.2-25e 为圆台孔形。一般作成横向剖分的结构形式。若允许过渡圆角 R 较大，当变形程度较小时也可作成整体。台角处应有排气孔隙。

图 6.2-25f 为圆台锥底形。尺寸按所镦鼓形球头的尺寸而定。

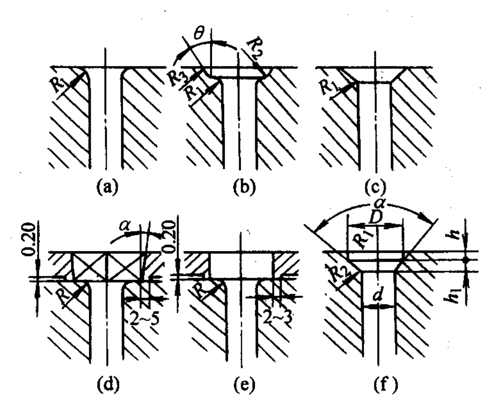


图 6.2-25　镦头凹模的常用型腔结构

图 6.2-26 所示为缩径凹模的型腔结构。缩径型腔的主要设计要求如下。

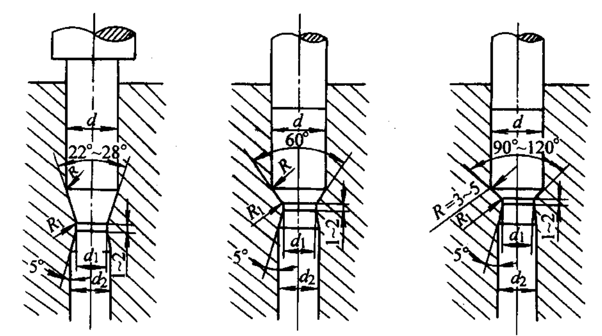


图 6.2-26　缩径凹模的型腔结构

图 6.2-26a 为缩径形，它适用于变形程度较小，即变形时断面缩减率 $\varepsilon \leqslant 28\%$ 的情况。缩径角 α 一般在 22° ~ 23°的范围内选取。定径带的宽度不能超过 2 mm，否则易产生热胶着。

图 6.2-26b 和图 6.2-26c 为正挤压形，其锥形及挤压带的过渡角都必须采用圆弧连接。一般断面缩减率为 $\varepsilon \leqslant 60\%$，图 6.2-26c 形状的断面缩减率可略大一点。挤压带宽度不能超过 2 mm。

图 6.2-27 所示为用于轴端倒角凹模的型腔结构。锥角 α 一般在 45° ~ 90°范围内选取，锥形拐角处应作成圆弧形。

(2) 预应力组合凹模

冷镦预应力组合凹模的优缺点、选用范围及设计方法与冷挤压预应力组合凹模基本相同。此处，仅对选用范围和设计方法简述如下。

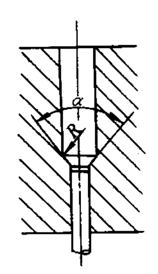


图 6.2-27　倒角凹模的型腔结构

1) 预应力组合凹模的选择。预应力组合凹模的层数根据单位冷镦力 p 的大小来选择，选用方法见图 6.2-28（考虑了足够的安全系数）。图中分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三个区域：Ⅰ为整体式凹模的适用范围；Ⅱ为两层组合凹模的适用范围；Ⅲ为三层组合凹模的适用范围。

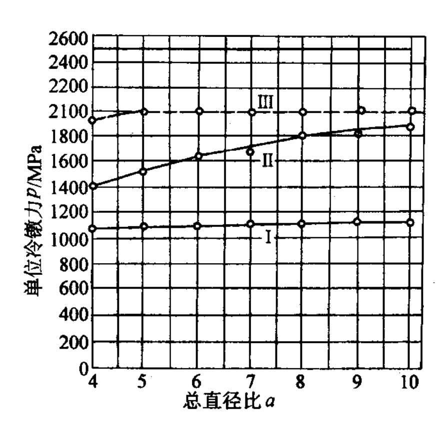


图 6.2-28　确定组合凹模层数的参考图

$$\text{总直径比 } a \begin{cases} a_4 = d_4/d_1 & \text{(对三层组合凹模)} \\ a_3 = d_3/d_1 & \text{(对两层组合凹模)} \end{cases}$$

2）预应力组合凹模的设计。凹模的组合形式见图 6.2-29。

硬质合金凹模镶块预应力结构的设计标准见表 6.2-16。

采用自动冷镦机冷镦制件时，组合凹模的外径由冷镦机的模腔尺寸确定。

凹模镶块、预应力环都为钢制件时，其尺寸取法如下：

$D_2 = 2.5D_1 + 8 \sim 10\ \text{mm} \approx 3D_1$

$D_3 =（6 \sim 8）D_1$（图 6.2-30）

3）凹模设计

① 沉头制件的凹模，尺寸见图 6.2-31 和表 6.2-17。

② 直孔凹模组合如图 6.2-32 所示。

③ 全螺纹缩径凹模组合如图 6.2-33 所示。

④ 直孔凹模，尺寸见图 6.2-34 和表 6.2-18。

⑤ 全螺纹缩径凹模，尺寸见图 6.2-35 和表 6.2-19。

(3) 凹模片

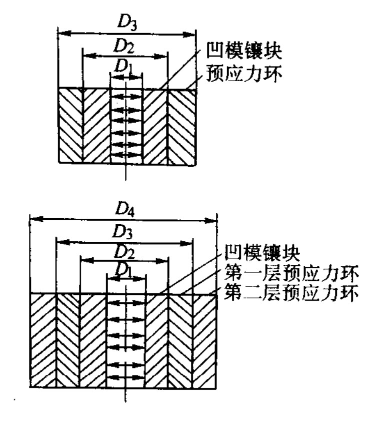


图 6.2-29 预应力组合凹模的结构型式

表 6.2-16 两层和三层压配的标准设计

预应力环	凹模镶块的壁厚	预应力环的壁厚		过盈量	
		第一预应力环	第二预应力环	镶块与第一预应力环	第一预应力环与第二预应力环
两层	$D_2 = 2.5D_1 + 8$	$D_3 \geq 2.5D_2$	—	$\frac{4D_2}{1\,000}$以下	—
三层	$D_2 =（2.2 \sim 3）D_1 + 1$	$D_3 \approx \sqrt{3}D_2$	$D_4 = \sqrt{3}D_3$	$\frac{4 \sim 6}{1\,000}D_2$	$\frac{2}{1\,000}D_3$

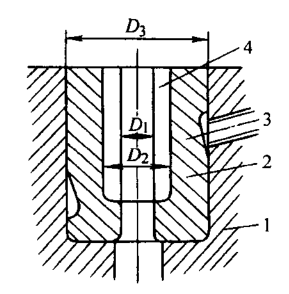


图 6.2-30 带有螺栓紧固面的组合凹模

1—模套；2—预应力圈；3—紧固螺栓；4—凹模镶块

1）镦内六角凹模片（图 6.2-36）凹模片尺寸按下式确定：

$$D = D' - 0.24 \sim 0.30$$

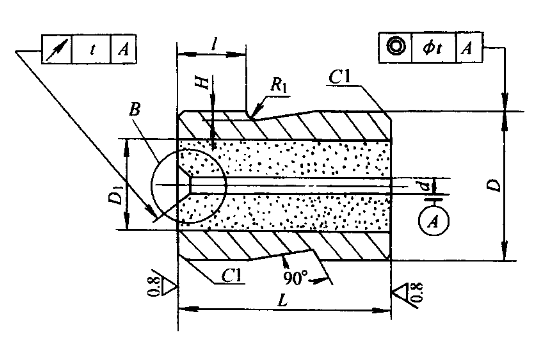
$$H = H' - 0.2$$

式中，D'为螺钉头部最大直径；H'为螺钉头部最大高度。

材料：60Si2

硬度：54～58HRC

2）镦六角模片（图 6.2-37）设计六角模片，必须考虑到镦锻后螺栓坯料能顺利排出模腔，因此六角模片应有出模斜度，一般选取模口比模底大 0.05～0.07 mm。六角模片有了斜度，能减少顶料销的轴向受力。另外一个要考虑的问题



其余 3.2

B放大

90°
d1
0.8
0.8
I型

90°
d1
0.8
0.8
h
II型

图 6.2-31 沉头制件凹模尺寸图

1. 材料 模套：5CrNiMo 模芯：YG20C

2. 硬度 模套：44～48HRC

表 6.2-17 沉头制件凹模尺寸

mm

螺纹规格		M2	M2.5	M2.5	M3	M4	M4	M5	M6
d	基本尺寸	1.67	2.14	2.14	2.60	3.46	3.46	4.39	5.25
	极限偏差	$^{+0.014}_{0}$				$^{+0.018}_{0}$			

续表 6.2-17

螺纹规格		M2	M2.5	M2.5	M3	M4	M4	M5	M6
d_1	基本尺寸	3.71	4.61	4.61	5.41	8.28	8.28	9.18	11.18
	极限偏差	+0.075 0				+0.090 0			+0.110 0
D	基本尺寸	25		30			35		
	极限偏差	−0.065 −0.117					−0.082 −0.142		
L	基本尺寸	30		40			50		
	极限偏差	0 −0.1							
h		0.15				0.20			0.30
r		0.10						0.15	
D_1		10	13					22	
l		10		13			16		
H		2.5		3.0			3.5		
同轴度 ϕt		0.05					0.06		
径向圆跳动 t		0.05					0.06		

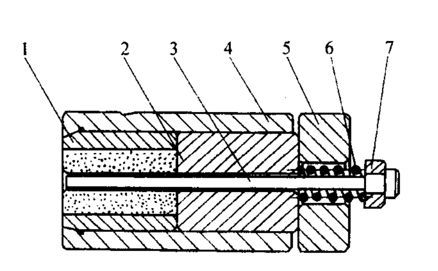


图 6.2-32 直孔凹模组合
1—初镦凹模；2—凹模垫块；3—顶料杆；4—凹模套；5—凹模后垫；6—弹簧；7—顶料杆套

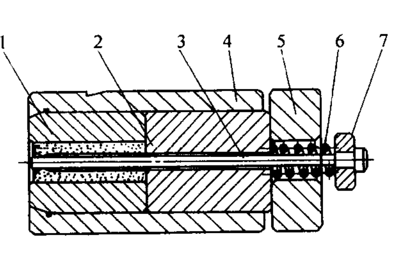


图 6.2-33 全螺纹缩径凹模组合
1—全螺纹缩径凹模；2—凹模垫块；3—顶料杆；4—凹模套；5—凹模后垫；6—弹簧；7—顶料杆套

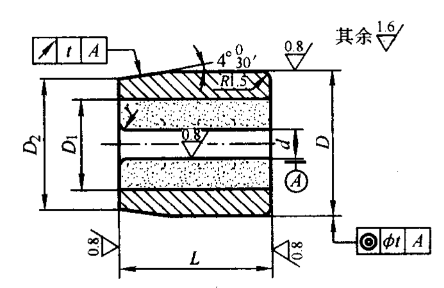


图 6.2-34 直孔凹模尺寸图
材料 模套：5CrNiMo；模芯：YG20C
硬度 模套：44～48HRC

表 6.2-18 直孔凹模尺寸 mm

螺纹规格			M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20
d	基本尺寸	GB/T 5782～5783—2000	3.78	4.78	5.78	7.71	9.71	11.67	13.67	15.67	17.60	19.60
		GB/T 5784－2000	3.43	4.36	5.21	7.04	8.85	10.67	12.49	14.49	—	18.16
	极限偏差		+0.018 0			+0.022 0		+0.027 0				+0.033 0
D	基本尺寸		30			38	48		62		78	
	极限偏差		+0.069 +0.048			+0.085 +0.060	+0.095 +0.070		+0.117 +0.087		+0.132 +0.102	
L	基本尺寸		29	34		42	52		66		80	
	极限偏差		0 −0.084	0 −0.100			0 −0.120					
D_2	基本尺寸		28.9			36.6	46.0		59.5		75.0	
	极限偏差		+0.085 +0.064			+0.105 +0.080	+0.122 +0.097		+0.152 +0.122		+0.176 +0.146	



续表 6.2-18

螺纹规格	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20
D_1	16			22	30		40		45	
r	0.3		0.4	0.6		0.8			1.1	
径向圆跳动 t	0.05			0.06			0.08			
同轴度 ϕt_1	0.05			0.06			0.08			

注：d 的基本尺寸中 GB/T 5782～5783—2000 也适用于 GB/T 5780～5781—2000 及 GB/T 5785～5786—2000。

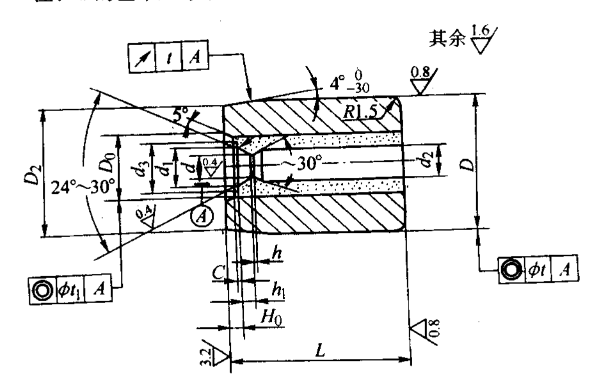


图 6.2-35 全螺纹缩径凹模尺寸图

是，六角模片的六条棱线不能做成尖角，而应略带一些圆角、对冷镦模具的设计来说，除了刀口模外，棱角尖的模具总是弊多利少。模具经热处理后，尖处易产生应力集中，受镦锻力后，尖角处易发生裂纹。为了避免这种情况，六角模片的六角棱线应给予适当的圆角 R。

圆角 R 的选择见表 6.2-20。

六角模片主要几何尺寸为：

$$S = S_{m\,min} + \left|\frac{\delta}{2}\right|$$

$$D = \frac{2}{3}\sqrt{3}S - R$$

$$H = h_m + 3 \sim 4\ \text{mm}$$

表 6.2-19 全螺纹缩径凹模尺寸 mm

螺纹规格		M3	M4	M5	M6	M8
d	基本尺寸	2.60	3.46	4.39	5.25	7.07
	极限偏差	$^{+0.014}_{0}$	$^{+0.018}_{0}$			$^{+0.022}_{0}$
d_1	基本尺寸	3	4	5	6	8
	极限偏差	$^{+0.060}_{0}$	$^{+0.075}_{0}$			$^{+0.090}_{0}$
d_3	基本尺寸	4.7	6.0	7.0	9.0	11.7
	极限偏差	$^{+0.075}_{0}$		$^{+0.090}_{0}$		$^{+0.110}_{0}$
C	基本尺寸	0.2		0.3		0.35
	极限偏差	$^{+0.10}_{0}$				
D_0	基本尺寸	6.3	7.9	9.0	11.3	14.6
	极限偏差	$^{+0.09}_{0}$			$^{+0.11}_{0}$	
H_0	基本尺寸	0.8	1.1	1.4	1.6	2.1
	极限偏差	$^{+0.10}_{0}$				
D	基本尺寸	30				38
	极限偏差	$^{+0.069}_{+0.048}$				$^{+0.085}_{+0.064}$
D_2	基本尺寸	28.9				36.6
	极限偏差	$^{+0.085}_{+0.064}$				$^{+0.105}_{+0.080}$

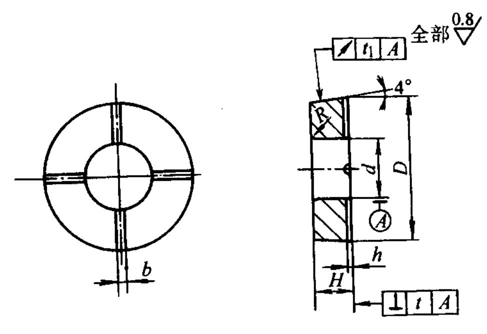


图 6.2-36　镦内六角凹模片

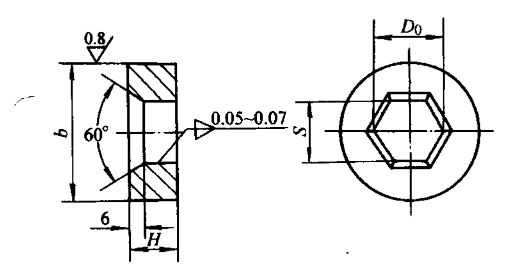


图 6.2-37　镦六角模片

表 6.2-20　圆角 R　　mm

规格	M3～M4	M4～M5	M6～M8	M10～M12
R	0.3	0.4	0.5～0.6	0.8～1.0

$$b = 2 \sim 2.5\ \mathrm{mm}$$

$$D_0 \geqslant 2S$$

式中，S 为六角模对边尺寸；$S_{m\,min}$ 为螺栓头部对边尺寸；D_0 为六角模对角尺寸；R 为六角模棱角的圆角；h_m 为螺栓头部厚度；δ 为产品的公差。

六角模片材料采用：Cr12MoV

热处理硬度：60～62HRC

六角模片和凹模套也必须采用过盈配合，其过盈量为 0.04～0.06 mm。规格大的螺栓，过盈量还要增加，否则模片容易碎裂。

3.3　切边模具设计

切边模具主要用于加工六角头、方头螺栓的头部和其他特殊形状制件的头部。

(1) 切边冲头

切边冲头组合如图 6.2-38 所示。图 6.2-39 为冲头图，冲模的外形尺寸 D 和 L 取决于冷镦设备的相关尺寸。切制孔尺寸 S_0（或孔形）与制件要求的形状和尺寸一致。

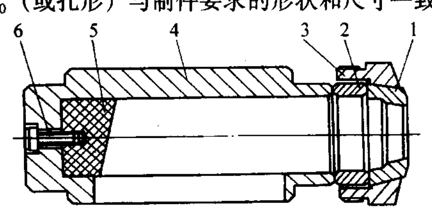


图 6.2-38　切边冲头组合

1—切边冲头（切边模）；2—切边冲头垫块；3—切边冲头套；4—切边冲头后垫；5—挡块；6—螺钉

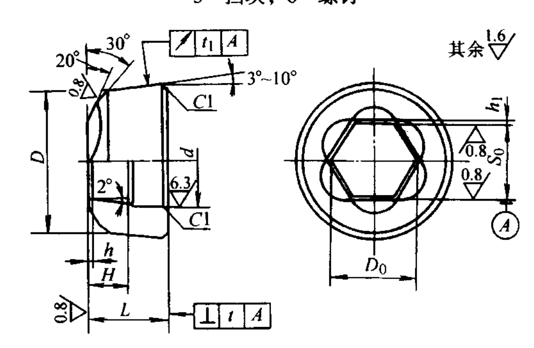


图 6.2-39　切边冲头

冲头的材料通常是 7Cr7Mo3V2Si 或 Cr12MoV；

热处理硬度为 58～60HRC。

表 6.2-21 是切制 GB/T 5782～5786—2000 及 GB/T 5780～5781—2000 六角螺栓冲头的设计举例。

(2) 切边凹模

切边凹模组合如图 6.2-40 示，图 6.2-41 为切边凹模。

凹模孔径 d 应按能保证毛坯进入的最大允许尺寸确定。

表 6.2-21　切边冲头尺寸　　mm

螺纹规格			M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20
标准对边宽度 S			5.5	7	8	10	13	16	18	21	24	27	30
S_0	基本尺寸	GB/T 5782～5786—2000	5.34	6.80	7.80	9.80	12.76	15.76	17.76	20.70	23.70	26.70	29.70
		GB/T 5780～5781—2000	—	—	7.66	9.66	12.60	15.60	17.60	20.20	23.20	—	29.20
	极限偏差		+0.048 0	+0.058 0			+0.070 0			+0.084 0			
D	基本尺寸		25				36			48		64	
	极限偏差		0 -0.084				0 -0.100					0 -0.120	
L	基本尺寸		12				15			20		25	
	极限偏差		0 -0.11							0 -0.13		0 -0.16	
$D_{0\,min}$			6.03	7.68	8.81	11.07	14.42	17.81	20.07	23.39	26.78	30.17	33.56



续表 6.2-21

螺纹规格	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20
d	15				24			30		42	
H	4				8			12			
h	1.0				1.2			1.5			
径向圆跳动 t_1	0.10				0.12					0.15	
垂直度 t	0.08				0.10			0.12		0.15	

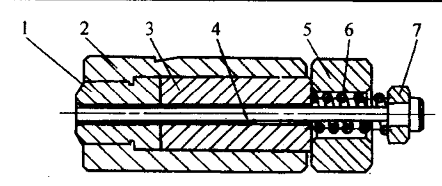


图 6.2-40 切边凹模组合

1—切边凹模；2—切边凹模模套；3—切边凹模垫块；6—顶料杆；5—切边凹模后垫；6—弹簧；7—顶料杆套

D_1 按制件最大切制尺寸确定。

30°角的斜面是为了排除飞边而设计。

凹模材料通常是 T10，热处理硬度为 58～60HRC。

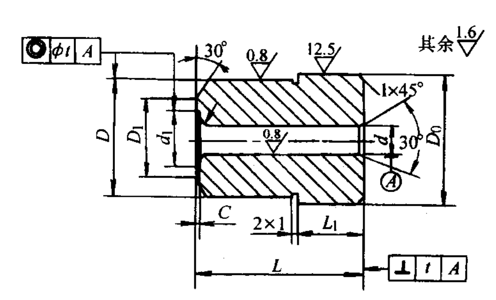


图 6.2-41 切边凹模

4 螺母类零件冷镦模具设计

螺母类冷镦模具设计程序，一般根据制件技术标准和技术条件来进行，其步骤如下。

1）设计制件两端凹穴形状和尺寸，普通六角螺母的凹穴形状和尺寸如图 6.2-42 示。

2）计算出每只制件坯料体积、重量，决定选用线材尺寸和计算切料长度。

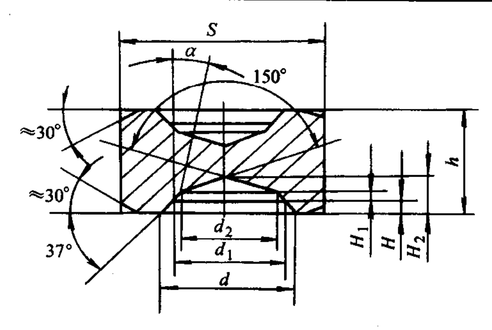


图 6.2-42 螺母两端凹穴图

3）设计鼓形球尺寸。

4）按标准确定冲孔工艺。

5）根据所得数据，再设计各道工序模具。

4.1 镦球模具设计

（1）镦球冲模

1）镦球冲模组合（图 6.2-43）。

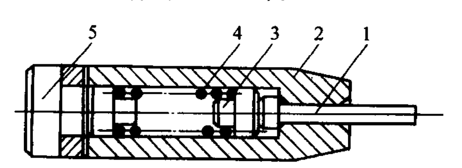


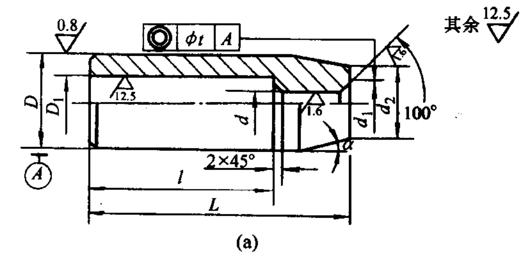
图 6.2-43 镦球冲模组合

1—镦球推杆；2—镦球冲模；3—镦球冲模推杆座；4—弹簧；5—镦球冲模垫块

2）镦球冲模尺寸（图 6.2-44）。

d = 鼓形球 D_M 尺寸

d_1 = 鼓形球外径 D 的最大尺寸



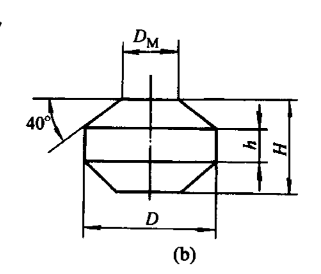


图 6.2-44 镦球冲模尺寸图

$D = (2 \sim 2.2)\ d_1$

L 按设计需要，不小于 $2.5D$

$\alpha = 5° \sim 10°$

$D_1 = (2 \sim 2.2)\ d$

$l = (0.6 \sim 0.7)\ L$

$d_2 = 0.8D$

材料：GCr15 或 T10

硬度：58～62HRC

（2）镦球凹模

1）镦球凹模组合（图 6.2-45）。

2）镦球凹模尺寸（图 6.2-46）。

M8～M16：$d = S - (0.4 \sim 0.5)$ mm

M18～M24：$d = S - (0.6 \sim 0.8)$ mm

$h = h_S - (0.5 \sim 1.0)$ mm



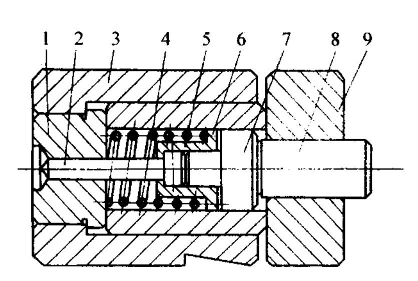


图 6.2-45 镦球凹模组合

1—镦球凹模；2—镦球凹模推杆；3—镦球凹模模套；4—镦球凹模垫块；5—弹簧；6—镦球凹模弹簧座；7—镦球凹模推杆座；8—镦球凹模推杆后垫；9—镦球凹模后垫

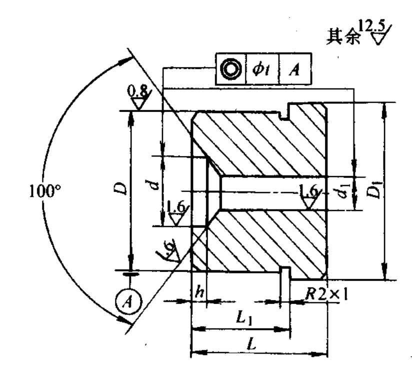


图 6.2-46 镦球凹模尺寸图

d_1：同镦球冲模 d 孔尺寸

$$D_1 = (2.1 \sim 2.3)\ D$$

材料：T10

硬度：58 ~ 62HRC

4.2 镦六角模具设计

冷镦过程中的最大力量作用在镦六角模具上，因此在全套模具中，这套模具不仅对制件质量有很大影响，而且自身寿命也很重要。

（1）镦六角冲头

1）镦六角冲头组合（图 6.2-47）。

2）镦六角冲头尺寸（图 6.2-48）。这种冲头结构形状和尺寸合理与否，对产品质量和冲头寿命有很大的影响，设计时必须考虑以下几个方面。

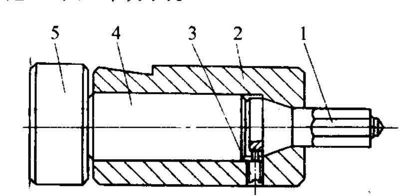


图 6.2-47 镦六角冲头组合

1—镦六角冲头；2—镦六角冲头模套；3—定位螺钉；4—镦六角冲头垫块；5—镦六角冲头模后垫

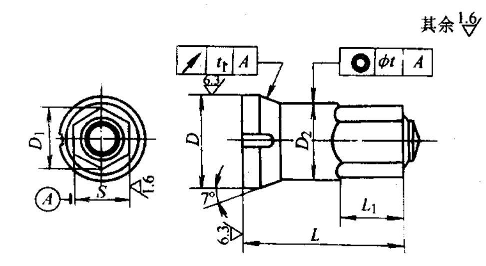


图 6.2-48 镦六角冲头尺寸图

① 有利于下道工序的冲孔。

② 有利于金属的变形，使六角容易成形。

③ 考虑螺母内外倒角的大小。

④ 冲头能方便顺利的脱出。

⑤ 有利于延长冲头的使用寿命。

主要设计尺寸可按表 6.2-22 中所列的公式计算。在生产实际中，根据对产品质量的分析，可对尺寸 d_1 和 H_1 适当的修正，以提高成形质量。其他尺寸按下述方法确定。

图 6.2-22 镦六角冲头尖顶的主要尺寸计算表（尺寸见图 6.2-42） mm

尺寸代号	计 算 公 式			
d_1	< M8	M8 ~ M14	M16 ~ M24	
	$d_{i\max} - 0.02 \sim 0.04$	$d_{i\max} - 0.05 \sim 0.10$	$d_{i\max} - 0.2 \sim 0.4$	
d	$d = (1.05 \sim 1.10)\ d_n$			
α	$\alpha = 10° \sim 15°$			
H_1	≤M6	M8 ~ M10	M12 ~ M16	M18 ~ M24
	$H_1 < 0.3$	0.4 ~ 0.5	0.6 ~ 1.0	1.4 ~ 1.6
d_2	$d_2 = d_1 - 2H_1 \tan(10° \sim 15°)$			

注：$d_{i\max}$ 为螺母内径的最大尺寸，mm；d_n 为螺母的公称直径，mm。材料：Cr12MoV 或 7Cr7Mo3V2Si。硬度：58 ~ 62HRC。

图 6.2-48 中，L 为按机床行程及模箱的条件选取，其夹紧部分在冲头夹持器中的长度最少应为 $0.4l$；L_1 为应为冲头进入六角凹模的深度 + 夹钳厚度 + 3 ~ 5 mm；S 为冲头六角部分的对边尺寸 = 六角螺母对边公称尺寸 − 0.3 ~ 0.5 mm；D 为冲头柄部外径 $D = (1.2 \sim 1.3)\ D_2$；D_1 为冲头六角部分的对角尺寸

$$D_1 = \frac{2}{\sqrt{3}}S - (0.5 \sim 1.2)\ \text{mm}$$

（2）镦六角凹模

1）镦六角凹模组合（图 6.2-49）。弹簧 3 的作用，在于当制件冷镦时起缓冲作用，使制件两端倒角均匀。镦六角凹模压紧在弹簧上，在自由状态下，镦六角凹模弹簧座突出模套 6 约 5 ~ 10 mm。当凹模组合紧固于凹模箱中时，下冲头座与模套压齐，因此凹模与弹簧间有一定的预应力。在冷镦时，镦六角凹模 1 有微量轴向移动，使制件两端倒角均匀。

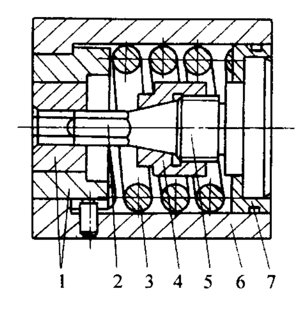


图 6.2-49 镦六角凹模组合

1—镦六角凹模；2—镦六角下冲头；3—弹簧；4—镦六角下冲头紧固螺母；5—镦六角下冲头座；6—镦六角凹模套；7—镦六角凹模弹簧座

2）钢制镦六角凹模（图 6.2-50）。六角凹模如图 6.2-50 所示。六角凹模的设计，关键在于 α、S、S_1 的选择及六角凹模高度 L_1 的决定。L_1 高度一般取：

$$L_1 = 2.8H_n$$

式中，H_n 为螺母公称厚度。

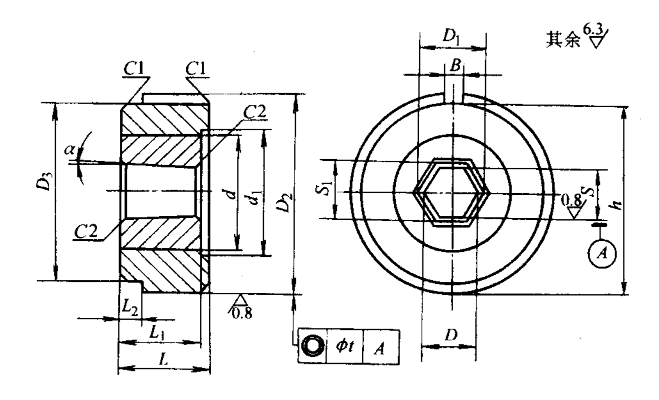


图 6.2-50 钢制镦六角凹模

α 一般取 0°30′～1°（M10～M24），按螺母规格不同选用，以冲孔后螺母 S 上下端尺寸符合国家标准为原则。螺母规格越大，冲孔后越易膨胀而使 S 超公差。所以 α 应与螺母规格成正比。另外一个因素也会影响冲孔后螺母的膨胀情况，就是螺母 S 和 H 之比。根据经验，$\frac{S}{H} \geqslant 2$ 的螺母冲孔后，膨胀情况就会好一些。GB/T 6172～6173 的薄型螺母冲孔后膨胀得很少。GB/T 6170～6171 普通螺母中 M8、M10、M14、比 M12、M16 情况就好。这与 S 和 H 之比有关。GB/T 6175～6176 型的厚螺母，冲孔时如不采取特殊措施，加大 α 也没效果。

α 决定后，就可选定 S 和 S_1 的尺寸。假定螺母在六角凹模中间偏下 0.5～2 mm 处成形（见图 6.2-51），此时 S_2 的尺寸应取：

$$S_2 = S_n - (0.10 \sim 0.15)\ \text{mm}\ (\text{M8 以上规格})$$

式中，S_n 为螺母对边公称尺寸。

在此位置，螺母下端尺寸可能小于要求的尺寸，但在冲孔时能得到补偿。

根据 α 及 S_2，可算出 S 和 S_1：

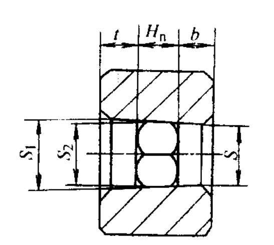


图 6.2-51 镦六角凹模尺寸图

$$S_1 = S_2 + 2t\tan\alpha$$

$$S = S_2 - 2(b + H_n)\tan\alpha$$

式中，H_n 为螺母公称厚度；t 为（0.9～1）H_n；b 为（0.8～0.9）H_n。

3）硬质合金镦六角凹模（图 6.2-52）。硬质合金镦六角凹模的尺寸见表 6.2-23。

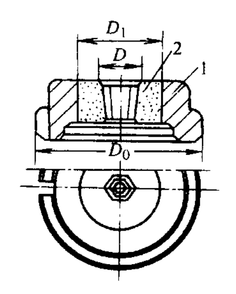


图 6.2-52 硬质合金镦六角凹模

1—模套；2—硬质合金

图 6.2-23 硬质合金镦六角凹模尺寸 mm

螺母规格	模具尺寸			配合过盈量
	D	D_1	D_0	
M4	7	30	60	0.16～0.18
M5～M8	8～16	40	60～80	0.18～0.20
M10～M14	19～25	50	80	0.26～0.28
M16	27	60	100	0.30～0.32

4）六片组合硬质合金镦六角凹模（图 6.2-53，表 6.2-24）。

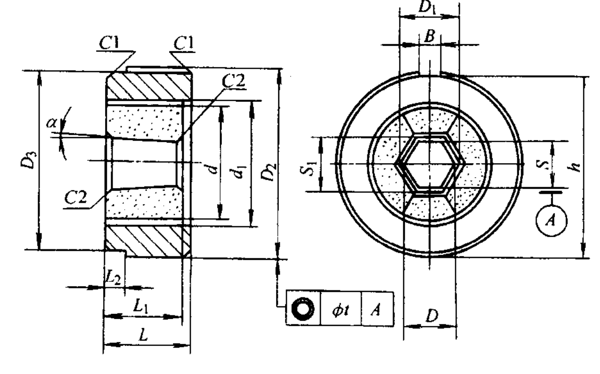


图 6.2-53 六片组合硬质合金镦六角凹模

表 6.2-24 六片组合硬质合金镦六角凹模尺寸 mm

螺母规格		M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20
S	基本尺寸	12.56	15.52	17.46	20.36	23.30	25.76	28.73
	极限偏差	+0.070 0			+0.084 0			

续表 6.2-24

螺母规格		M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20
S_1	基本尺寸	12.90	15.94	17.99	20.98	24.04	26.56	29.60
	极限偏差	+0.070 0			+0.084 0			
D_2	基本尺寸	65	80	88		128		
	极限偏差	0 -0.074		0 -0.087		0 -0.100		
L	基本尺寸	25	35	40		50		
	极限偏差	0 -0.13	0 -0.16					
D_{min}		14.19	17.54	19.73	23.01	26.33	29.11	32.47
D_{1min}		14.58	18.01	20.33	23.71	27.17	30.01	33.45
D_3		60	75	80		120		
L_1		20	24	30	36	42	46	50
L_2		10	12	15				
d		32	40	44	52	58	66	72
d_1		40	48	52	60	66	74	80
B		5		8				
h		62.5	77.5	84		124		
α		30′						
同轴度 +		0.08				0.10		

4.3 冲孔模具设计

（1）冲孔冲头

1）冲孔冲头组合（图 6.2-54）。

2）冲孔冲头尺寸（图 6.2-55）。冲头头部形状与冲孔质量及使用寿命有很大的关系。

刃带直径：$d = d_{i\,max}$

刃带宽度：$h = 0.3 \sim 0.5$ mm

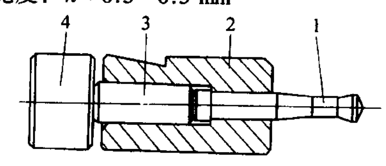


图 6.2-54 冲孔冲头组合

1—冲孔冲头；2—冲孔冲头模套；3—冲孔冲头垫块；4—冲孔冲头模后垫

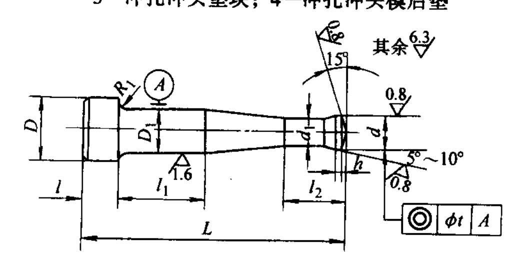


图 6.2-55 冲孔冲头

刃带斜度：5°～10°

顶部锥角：150°

颈部直径：$d_1 = d -$（1～2）mm

柄部直径：$D_1 = d_n$

连接圆弧半径：$R = 2 \sim 4$ mm

台阶直径：$D = D_1 +$（4～6）mm

设计冲头总长时，应按机床的具体尺寸，保证冲针穿过螺母后还要进入凹模 3～8 mm，以使废料不至被冲针带回。冲针柄部长度 $L_1 \geqslant 0.4L$。

当被冲螺母的规格小于 M12 时，冲针的柄部可以作成直柄，但必须采用两半开的夹持器夹紧，夹持长度应不小于 $0.5l$。

材料：W18Cr4V 或 7Cr7Mo3V2Si

硬度：58～62HRC

（2）冲孔凹模

1）冲孔凹模组合（图 6.2-56）

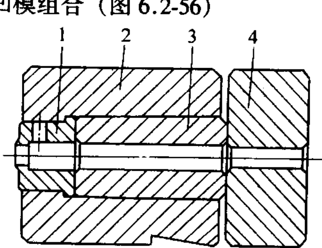


图 6.2-56 冲孔凹模组合

1—冲孔凹模；2—冲孔凹模套；3—冲孔凹模垫块；4—冲孔凹模后垫

2）冲孔凹模尺寸（图 6.2-57）。冲孔凹模尺寸按以下原则确定：

凹模孔径 d：与冲孔冲头间隙 0.03～0.05 mm；

凹模外径 D：与模套配合过盈量 0.01～0.03 mm，大于被冲零件支承面最大尺寸（对螺母必须大于螺母对角尺寸）。

材料：60Si2MnA。

硬度：58～62HRC。

（3）反冲孔模具

反冲孔模具有几个优点。

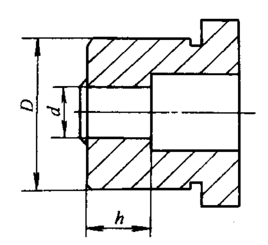


图 6.2-57 冲孔凹模

① 螺母 S 面不会膨胀。

② 镦六角冲头 H_1（见图 6.2-42）可适当放高，上冲头不存在螺母不易脱落的现象，所以 α 角可取 1°~5°，此时 $d_2 \approx d_1$，可改善冲孔时孔径拉塌现象。

③ 废料在滑块一端排出，即使在冲孔模中带出，也不会砸坏夹钳和模具。

④ 省去冲孔退料板，使凹模箱部份容易观察清楚。

另外，如采用反冲孔工艺，六角凹模锥度 α 不宜超过 0°30'~0°40'，否则会造成螺母下端因膨胀不足而 S 面过小。因此时膨胀是在螺母上端，设计模具时应注意。

1）反冲孔冲头组合（图 6.2-58）。

2）反冲孔凹模组合（图 6.2-59）。

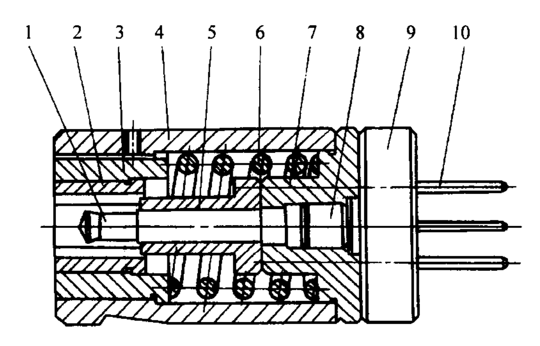


图 6.2-58 反冲孔冲头组合

1—反冲孔冲头；2—反冲孔六角模；3—反冲孔六角模套；4—反冲孔六角模外套；5—反冲孔推料套；6—弹簧；7—反冲孔冲头座；8—反冲孔冲头垫块；9—反冲孔六角模后垫；10—反冲孔推料杆

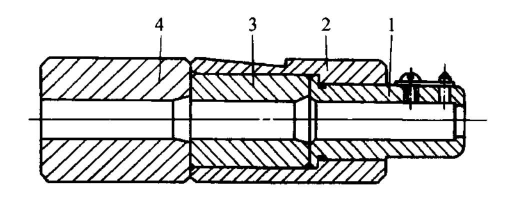


图 6.2-59 反冲孔凹模组合

1—冲孔凹模；2—冲孔凹模套；3—冲孔凹模垫块；4—冲孔凹模后垫

5 通用模具设计

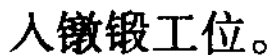
5.1 切料模具设计

毛坯的切口质量取决于切料模与材料之间的间隙和切料模与材料刀之间的间隙。

（1）切料刀

1）切料刀组合。型式Ⅰ如图 6.2-60 所示；型式Ⅱ（Z47—12 等专用）如图 6.2-61 所示。

Ⅱ型与Ⅰ型不同之处是省去了切料刀压板、弹簧、双头螺柱、螺钉、螺母、垫圈。坯料被切断后由一把夹钳接料送入镦锻工位。



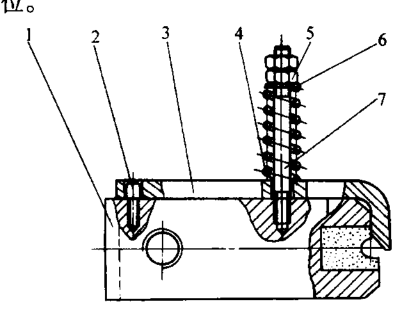


图 6.2-60 切料刀组合（型式Ⅰ）

1—切料刀；2—螺钉；3—切料刀压板；4—弹簧；5—六角螺母；6—垫圈；7—双头螺柱

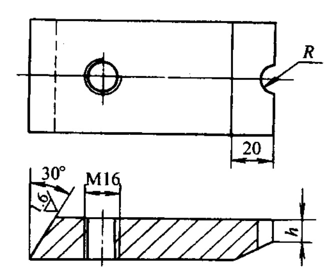


图 6.2-61 切料刀（型式Ⅱ）

2）切料刀尺寸（图 6.2-62）。该切料刀上设计的 15°斜度的部分是为了避免冲头和切料刀碰撞。因为当冲头接近切料模时，材料一边进入切料模，切料刀一边后退。这一斜度部分，可避免两者相碰。切料刀的切削刃部分 R 取所用线材的最大直径的 1/2，再适当增大 0.8 mm 到 0.5 mm。

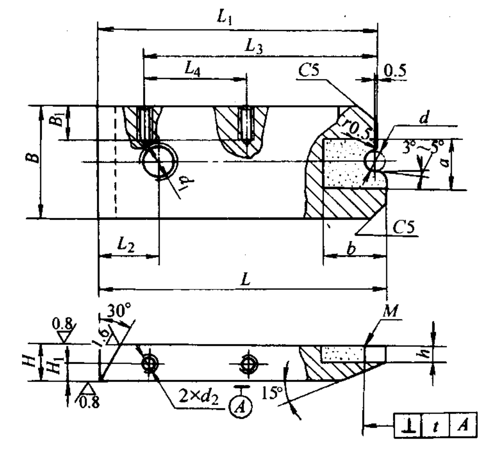


图 6.2-62 切料刀尺寸图

（2）切料模

1）切料模组合（图 6.2-63）

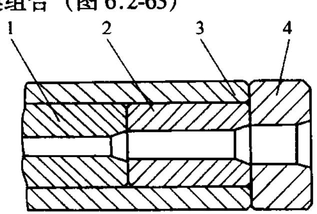


图 6.2-63 切料模组合

1—切料模；2—模套；3—模垫；4—后垫

2）切料模尺寸（图 6.2-64）。为使线材能够顺利进入模孔，将进口部制成喇叭状。切料模的切削刃部分的孔径 d，要比使用的线材直径大 0.05~0.1 mm，使线材能够顺利通



过，导向孔径 d_1 取 d 的 1.2 倍，角度 α 取 20°～30°。切削刃不锋利时，可反复进行修磨使用。

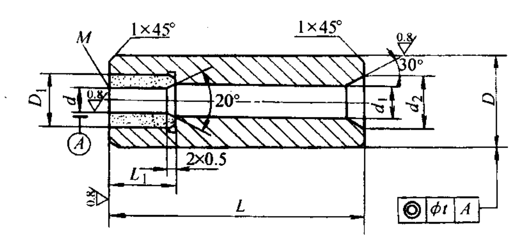


图 6.2-64　切料模

硬质合金镶块进行压装的过盈量等于工作孔径的 0.5%～1.5%。为切取冷镦用的低碳钢毛坯所推荐的过盈量见表 6.2-25。

当切断含碳量较高的钢毛坯和合金钢毛坯时，过盈量应提高 20%～30%。而切断较软的有色金属毛坯（铜和铝）时，过盈量可降低 20%～30%。

表 6.2-25　切断模硬质合金镶块的压装过盈量

mm

零件	毛坯直径	过盈量
3 mm 铆钉	2.85	0.04～0.06
3.5 mm 铆钉	3.35	0.04～0.06
4 mm 铆钉	3.85	0.04～0.06
5 mm 铆钉	4.85	0.04～0.06
6 mm 铆钉	5.85	0.06～0.08
13 mm 铆钉	12.30	0.08～0.10
M10 螺栓	8.75	0.06～0.08
M12 螺栓	11.50	0.08～0.10
M14 螺栓	12.43	0.08～0.10
M16 螺栓	14.45	0.10～0.12
M6 螺母	8.00	0.08～0.10
M8 螺母	10.00	0.08～0.10
M10 螺母	12.5	0.08～0.10
M12 螺母	16.0	0.10～0.12

5.2　滚压工具设计

滚压螺纹使用的工具有三种：滚丝轮、搓丝板、扇形丝板。

滚丝轮是滚丝机使用的工具，搓丝板是搓丝机使用的工具，扇形丝板是行星式滚丝机使用的工具。

（1）滚丝轮（图 6.2-65）

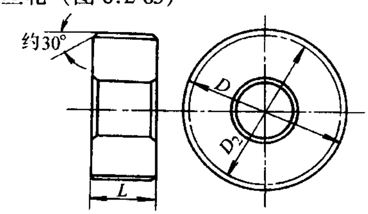


图 6.2-65　滚丝轮

滚丝轮的尺寸按下列公式确定

1）滚丝轮中径 D_2

$$D_2 = Zd_2$$

式中，Z 为滚丝轮螺纹线数；d_2 为制件螺纹中径。

2）滚丝轮外径 D

$$D = D_2 + 2h_1$$

式中，h_1 为螺纹牙顶高。

3）螺纹升角 β

$$\tan\beta = \frac{P}{\pi d_2}$$

式中，P 为螺距；d_2 为制件螺纹中径。

4）滚丝轮的宽度 L 一般为 50～150 mm。

加工普通螺纹的滚丝轮的基本尺寸和技术要求见 GB/T 971—1994。

使用两个滚丝轮进行滚压时，需要用支板将坯料支撑住如图 6.2-66 所示，支板顶部通常焊有高速钢或硬质合金块。

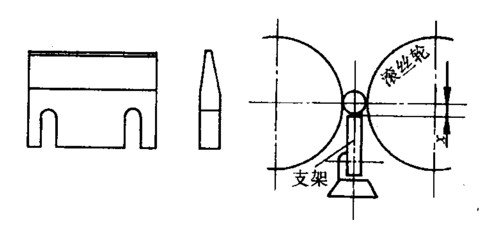


图 6.2-66　支板

滚压时支板的位置 x（mm）按下式确定：

$$x = \frac{d}{2} + 0.2\ \text{mm}$$

式中，d 为制件螺纹外径，mm。

（2）搓丝板（图 6.2-67）

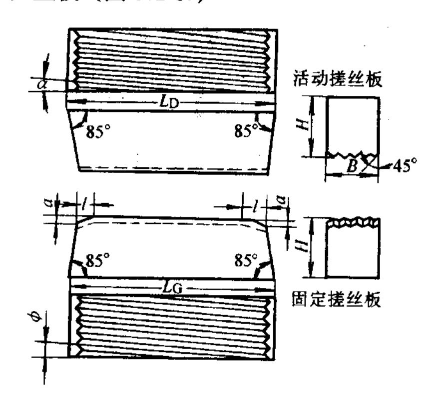


图 6.2-67　搓丝板

搓丝板的升角 β 由下式决定：

$$\tan\beta = \frac{P}{\pi d_2}$$

式中，P 为螺距；d_2 为制件螺纹中径。

搓丝板的全长 L 一般规定为螺纹直径的 14～20 倍。

切入部分的长度和退出部分的长度 l 取螺纹外径的 3 倍，其角度是 3°～7°。因搓丝板的两侧容易损伤，所以要磨成 30°～45°角。在制作搓丝板时，为了减少热处理变形和提高螺纹精度，热处理后要对搓丝板，包括切削刃部分用螺纹磨床进行精磨，热处理硬度最好为 58～62HRC，若硬度过高，容易损伤。搓丝板是使用范围很广的工具，除用于滚压螺纹外，也用于滚花和木螺钉的螺纹滚压。

加工普通螺纹和搓丝板的基本尺寸和技术要求见 GB/T 972—1994。

（3）扇形丝板（图 6.2-68）

扇形丝板和转动丝辊的工作部分尺寸（图 6.2-69）按下列公式确定。

1）转动丝辊的外径 D_1

$$D_1 = Zd_2 + 2h_1$$



式中，Z 为转动丝辊螺纹线数；d_2 为制件螺纹中径；h_1 为螺纹牙顶高。

2）扇形丝板内径 D_2

$$D_2 = (Z+2)\ d_2 + 2h_1 + a$$

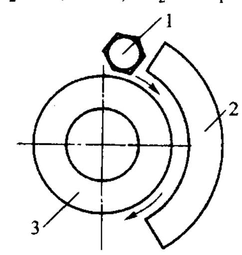


图 6.2-68 扇形丝板

1—坯料；2—扇形丝板（固定）；3—转动丝辊（回转）

式中，Z 为转动丝辊螺纹线数；d_2 为制件螺纹中径；h_1 为牙顶高；a 为修正值。

3）扇形丝板外径 D_3 根据所使用的机床决定。

4）切入部分与退出部分的长度取 2.5P 以上（P 为螺距）。

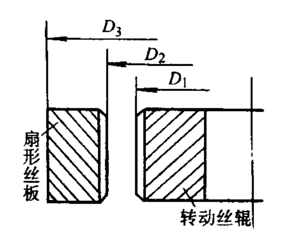


图 6.2-69 扇形丝板与转动丝辊

编写：吴家贤（湖北省机械工业厅）



第3章　温　　锻

1　温锻成形材料及其加热

1.1　温锻的特点

温锻是在冷锻基础上发展起来的一种少无切屑塑性成形新工艺。温锻是将预热的毛坯放入模具内，在压力机及模具作用下，使金属与合金产生塑性变形，从而可以获得所要求的形状、尺寸及一定性能的产品所采用的工艺。有镦锻、挤压、缩径、辊压等[1]几种，它的变形温度通常认为是在室温以上再结晶温度以下的温度范围内。目前，常见的温锻温度范围，对黑色金属来说；一般是200~850℃；对有色金属来说是从室温以上到350℃以下。也就是说，基本上是处于金属的不完全冷变形与不完全热变形的温度范围。

温锻的优点为依靠加热降低了材料的变形抗力，因此对锻压设备和工模具强度方面有利。虽说是加热，但在中温范围没有氧化皮，所以氧化和脱碳的顾虑少。工件和热锻不同，其力学性能可达到冷锻件同样高的强度。精度方面也可以靠控制坯料和工模具的温度而达到与冷锻相媲美的程度。特别对于奥氏体不锈钢以及新的高强度钢种和耐热钢一类难以用冷锻成形的材料，温锻也可以使其作一定程度的变形，可以说这是一个很大的优点。

温锻是将坯料加热到比热锻温度低的某一温度进行加工。由于金属被加热，坯料的变形力比冷锻小，成形比冷锻容易，可以采用比冷锻大的变形量，从而减少工序数目，减少模具费用和压力机的吨位，有可能采用锻压设备刚性稍低的通用锻压设备，模具寿命也可能比冷锻时高。另一方面与热锻相比，由于加热温度低，氧化、脱碳减轻，产品尺寸公差等级较高与表面粗糙度较低。如在低温范围内温锻，产品的力学性能与冷锻产品差别不大；对不易冷锻的材料，例如，析出硬化相的不锈钢和中高碳钢，含铬量高的一些钢，高温合金以及镁及镁合金、钛及钛合金等，改用温锻可减少加工难度。甚至对合金工具钢和高速工具钢也可以顺利地进行一定变形程度的温锻成形。

温锻也适宜于冷锻的低碳钢，因为温锻常常不需要进行坯料预先软化退火和工序之间的退火，也可能不进行表面磷化处理，这就使得组织连续生产比冷锻时容易。钢在温锻，冷锻与热锻时的技术经济比较如表6.3-1所示。

温锻主要用于以下几种情况。

1）冷锻变形时硬化剧烈或者变形力高的不锈钢、合金钢、轴承钢和工具钢等。

2）冷变形时塑性差、容易开裂的材料，如铝合金LC4、铜合金HPb59-1等。

3）冷态难加工，而热态时严重氧化，吸气的材料，如钛、钼，铬等。

4）形状复杂，或者为了改善产品综合力学性能而不宜采用冷锻时。

5）变形程度较大，或者零件尺寸较大，以致冷锻时现有设备能力不足时。

表6.3-1　钢温锻与冷锻、热锻的技术经济比较

项　　目	变形方法		
	热锻	温锻	冷锻
变形温度范围/℃	850~1 200	200~850	室温
产品精度/mm	±0.5	±0.05~0.25	±0.03~0.25
产品组织	晶粒粗大	晶粒细化	晶粒细化
产品表面质量	严重氧化、脱碳	几乎没有氧化、脱碳	无氧化、脱碳
工序数量	少	比冷锻少	多
能量消耗	大	少	少
劳动条件	差	较好	好

6）为了便于组织连续生产时。

国内外目前已有各种零件使用温锻的方法生产。这些零件包括：紧固件、齿轮、阀、活塞、汽缸、扳手、轴承套圈、手表壳、万向节头、后车轴、微电机壳体、涡轮发动机杯套零件、汽车轮胎螺母等。这些零件原先或者用热锻、冷锻或者用机械加工生产。采用温锻后，均取得较好的技术经济效益。

1.2　温锻成形材料

由于温锻兼有冷、热锻的长处而又避免了它们的缺点，所以具有比冷锻成形抗力低、成形性能好特点。它可对强度高、塑性差的材料，如高碳钢、高合金钢、不锈钢、轴承钢、工具钢、高温耐热合金、精密合金及有色合金等，进行成形加工。

目前温锻常用材料的化学成分和力学物理性能见表6.3-2、表6.3-3。

钢的力学性能主要取决它的化学成分和组织结构，而钢的组织结构在很大程度上取决于热处理制度。钢在低于550~600℃温锻成形时，应进行软化处理及磷化处理，当温锻成形温度高于600℃时，坯料原始状态对温成形挤压力影响不大，钢的温锻生产工艺流程见图6.3-1所示。

1.3　温锻温度的选择

由于产品对象不同、零件的变形程度不同、设备条件不同、对产品的性能和尺寸公差等级要求不同以及对产品的表面粗糙度要求不同选择的温锻温度也会有所不同。

在选择温锻温度时一般应考虑以下几个问题。

1）温度对材料流动应力和塑性的影响。除了塑性较低的材料需考虑塑性指标的变化以外，主要是考虑温度对材料流动应力的影响。希望选择在流动应力较小的温度或者越过

表 6.3-2　具有代表性的温锻用钢材

钢　种	成分（质量分数）/%							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
碳素钢	0.18~0.23	0.15~0.35	0.30~0.60	0.030>	0.035>			
	0.23~0.28	0.15~0.35	0.30~0.60	0.030>	0.035>			
	0.32~0.38	0.15~0.35	0.30~0.60	0.030>	0.035>			
	0.40~0.46	0.15~0.35	0.30~0.60	0.030>	0.035>			
	0.50~0.56	0.15~0.35	0.30~0.60	0.030>	0.035>			
铬钢	0.38~0.43	0.15~0.35	0.60~0.85	0.030>	0.030>		0.90~1.20	
	0.13~0.18	0.15~0.35	0.60~0.85	0.030>	0.030>		0.90~1.20	
	0.18~0.23	0.15~0.35	0.60~0.85	0.030>	0.030>		0.90~1.20	
铬钼钢	0.33~0.38	0.15~0.35	0.60~0.85	0.030>	0.030>		0.90~1.20	0.15~0.30
	0.13~0.18	0.15~0.35	0.60~0.85	0.030>	0.030>		0.90~1.20	0.15~0.30
	0.18~0.23	0.15~0.35	0.60~0.85	0.030>	0.030>		0.90~1.20	0.15~0.30
镍铬钼钢	0.25~0.35	0.15~0.35	0.35~0.60	0.030>	0.030>	2.50~3.50	2.50~3.50	0.50~0.70
	0.17~0.23	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030>	0.030>	0.40~0.70	0.40~0.65	0.15~0.30
	0.12~0.18	0.15~0.35	0.40~0.70	0.030>	0.030>	1.60~2.00	0.40~0.65	0.15~0.30
工具钢	0.80~0.90	0.35>	0.50>	0.030>	0.030>			
轴承钢	0.95~1.10	0.15~0.35	0.50>	0.025>	0.025>		1.30~1.60	
常用钢	抗拉强度 41~52 kgf/mm²							
不锈钢	0.08>	1.00>	2.00>	0.040>	0.030>	8.00~10.50	18.00~20.00	
	0.15>	0.50>	1.00>	0.040>	0.030>	(0.60>)	11.50~13.00	

表 6.3-3　温锻常用材料的物理力学性能

材料＼性能	屈服极限 σ_s/MPa	强度极限 σ_b/MPa	延伸率 δ/%	断面收缩率 ψ/%	硬度 HBS	线胀系数 $\alpha/10^{-6}K^{-1}$	状态
10	200	320~340	32	55	100~110	13.5~14.3	退火
20	230	390~420	28	55	110~120	13.5~14.3	退火
30	300	500	21	50	120~130	13.5~14.3	退火
40	340	580	19	45	140~150	13.5~14.3	退火
50	360	600	24	50	160~170	13.5~14.7	退火
20Cr	300	490	32	47	120~130	13.6	退火
18CrMnTi	360	520	18	45	130~140	13.8	退火
1Cr13	280	400	35	75	135~140	12	退火
1Cr18Ni9Ti	200	550	55	65	140~145	17.6	淬火
GCr15	580	650	30	50	160~180	13.6	退火

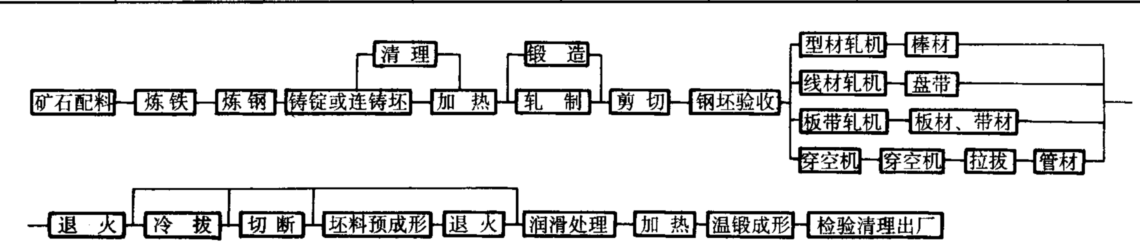


图 6.3-1　钢坯与温锻生产工艺流程

较大流动应力的温度进行加工。

图 6.3-2 示出碳钢的加工温度与压缩流动应力的关系曲线[5]。由图可见，这组曲线的总趋势是温度愈高，流动应力愈低。而且，含碳量高的碳钢，其流动应力随温度的提高而下降的程度比含碳量低的更要显著一些。

这组曲线是在应变速率较小的情况下得出的。应变速率为 0.1 s^{-1}，可视为静变形。由图可见，在 300℃左右，流动应力有回升现象，这就是蓝脆现象。在蓝脆温度范围内，材料的塑性也较差。金属材料出现蓝脆的温度范围，与应变速率有密切关系。当应变速率增加时，蓝脆区域向温度高的方向移动，如图 6.3-2 所示。这时，流动应力也比速率低的时候要下降一些。由图可见，15 钢在应变速率为 40 s^{-1}，蓝脆出现在 450℃以上。应变速率 40 s^{-1}，是与在曲柄压力机上实际挤压生产的应变速率相一致的。在液压机上温锻时的应变速率，常常可以参照所谓静变形时的应变速率。这样，也就可以预测在液压机上温锻时蓝脆出现的大概温度。

低、中碳钢，低合金钢（如 15CrMn、35CrMo、30CrMnSi 和轴承钢 GCr15）都存在蓝脆现象。其中以低碳钢最为明显。在中或高合金钢、工具钢、不锈钢等中因合金元素众多的影响，使蓝脆变得不明显或消失。为了降低变形力，低碳



钢的加热温度必须高于 300℃。过去有人在金属相变温度范围对钢试件作压缩和拉伸试验，发现在相变区金属会失去本身的塑性。但是近十几年来，国内外许多工厂对一些钢进行温锻，恰恰就在相变温度范围内。特别是高强度钢往往在 700～800℃时变形力显著降低，便于进行温锻。700～800℃处于珠光体转变为奥氏体的相变温度区内，即在铁－碳平衡图的 Ac1 与 Ac3 之间。实践证明，在相变温度范围内温锻，不但可以满足塑性要求，而且零件经过金相分析、力学性能试验以及实际使用，都没有发现任何不良现象。各类材料的流动应力和塑性指标与温度的关系曲线分别列示如下。这些曲线是用拉伸试验得出的。拉伸夹头速度符合静力试验要求，即夹头速度在屈服点以后不大于试样计算长度的 0.4 倍。

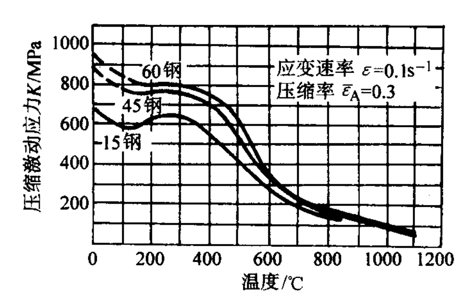


图 6.3-2 碳钢的加工温度与压缩流动应力的关系

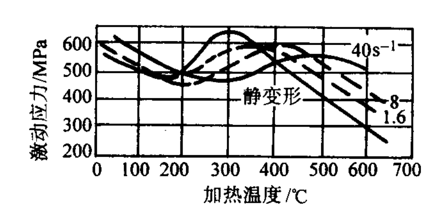


图 6.3-3 钢 15 在各种应变速率下加工温度与压缩流动应力的关系

（图中的静变形是指应变速率为 0.25 s^{-1}）

① 碳钢。图 6.3-4 示出 45 钢在各种温度时的力学性能变化。由图可见，抗拉强度 σ_b 从室温到 300℃略有下降，在 300～450℃之间，出现上升峰值，这一区间就是蓝脆区。过了蓝脆区，σ_b 下降较为剧烈。至 650℃，σ_b 约为 200 MPa；至 800℃，约为 100 MPa 与此同时，塑性指标明显上升。为了降低变形力，加热温度应高于蓝脆区。

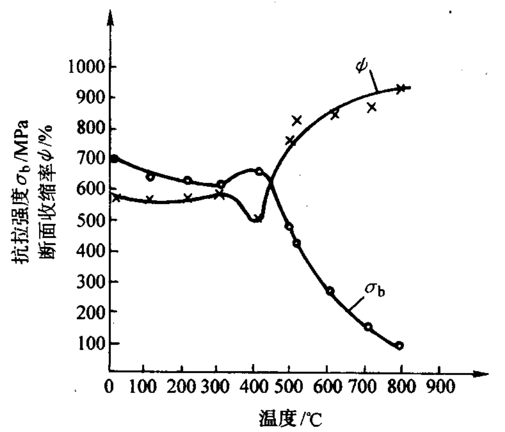


图 6.3-4 钢 45 在各种温度时的力学性能变化

② 合金结构钢。图 6.3-5 示出合金结构钢 30CrMnSiA 在各种温度时的力学性能变化。在 300℃左右出现蓝脆。过了蓝脆区，σ_b 剧烈下降。

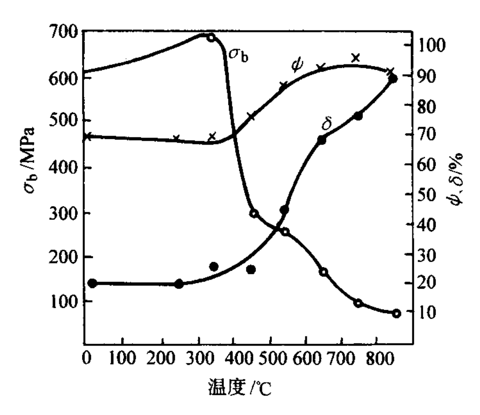


图 6.3-5 30CrMnSiA 在各种温度时的力学性能

（原材料为退火状态）

③ 奥氏体不锈钢。图 6.3-6 示出奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 在各种温度下的力学性能。由图可见，在从室温升至 200℃时，抗拉强度急剧下降，而在 200℃升至 500℃时，抗拉强度几乎不发生变化；在高于 500℃以后又开始急剧下降。因此，如仅从温度对变形力的影响来看，对奥氏体不锈钢的温锻温度不是选在低温范围 200℃左右，就应该在 500～600℃以上。

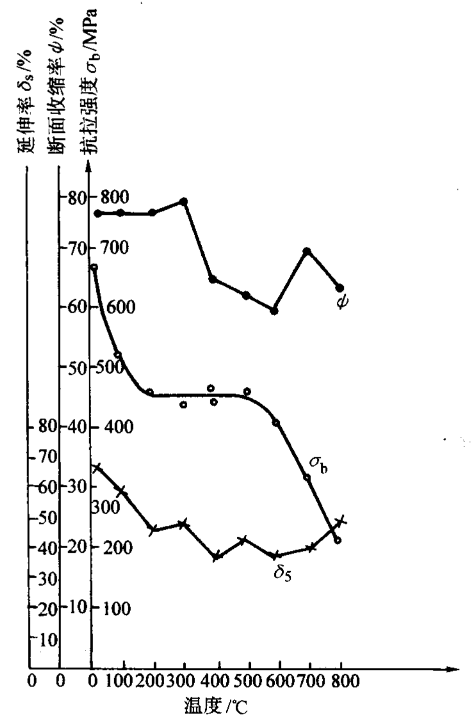


图 6.3-6 1Cr18Ni9Ti 在各温度下的抗拉强度（σ_b）伸长率（δ_5）和断面收缩率（ψ）（1:10）

（试样经 1 100℃，保温 8～10 min，在沸水中淬火，HB＝130）

④ 马氏体不锈钢。2Cr13 的强度—温度关系曲线如图 6.3-7 所示。由图可见，在高于 600℃时，强度明显下降。为了获得较低的变形力，应在 600℃以上作温锻变形，即选择温锻温度高于其回火温度。

⑤ 高温合金。高温合金 GH140 在各温度时的力学性能如图 6.3-8 所示。从室温到 300～400℃，抗拉强度大约下降 10%以上。在 400～600℃，抗拉强度几乎不发生变化。超过 600℃以后。抗拉强度明显下降。在 800℃时，抗拉强度比室温时下降 61%。因此，从降低变形力的观点来看，温锻温度应选在 300～400℃或 600～800℃范围。但是 GH140 比 18－8 型不锈钢粘模更为严重，而且温锻温度愈高，粘模愈严

重。因此，在当前使用的润滑剂条件下，实际生产只能选在300～400℃作为温锻温度范围。

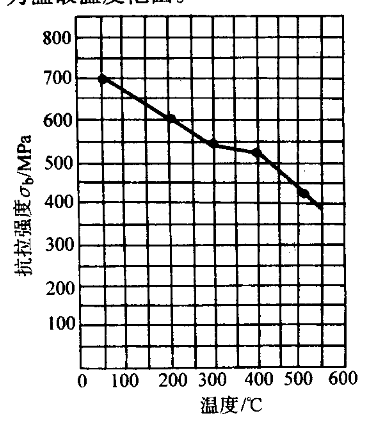


图 6.3-7　2Cr13 的强度－温度曲线[10]

（回火状态）

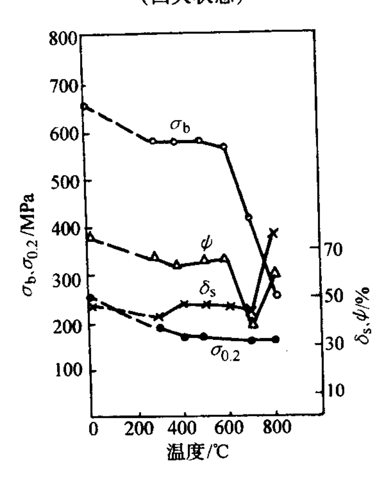


图 6.3-8　GH140 在各种温度下的力学性能

（试样经 1 050℃加热，保温 10 min，冷水中冷却）

⑥ 铝合金。2A12 和 7A04 铝合金，室温时相对伸长率小于20%，为低塑性材料。图 6.3-9 和图 6.3-10 分别为 2A12 和 7A04 铝合金的力学性能与温度的关系曲线。可见，随温度上升，抗拉强度不断下降，而塑性指标不断上升。在200℃以前，曲线变化平缓，而在 200～350℃之间，变化较快。超过 350℃，变化又趋平缓。在 250～400℃之间，强度比室温时已大幅度下降，同时塑性变好。

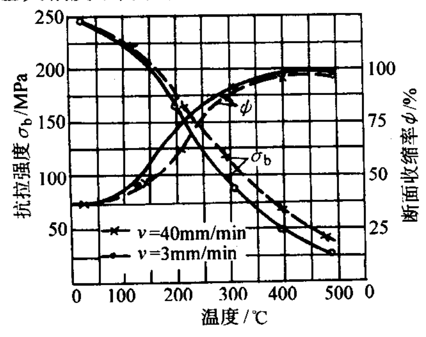


图 6.3-9　2A12 力学性能与温度的关系

（试样经 410℃保温 3 h，炉冷退火）

2）钢的强烈氧化问题。一般钢在温度高于 800℃以上氧化变为剧烈。图 6.3-11 示出 15 钢在不同加热温度下的氧化情况由图可见，低于 800℃温锻，氧化程度很小。特别采用快速加热法，毛坯加热前涂固体润滑剂等都有助于防止毛坯加热时的氧化，至于高铬钢（1Cr18Ni9Ti，Cr17Ni2，Cr9Si2，2Cr13，4Cr13 等）在 700℃以前几乎没有氧化问题（只变色）。

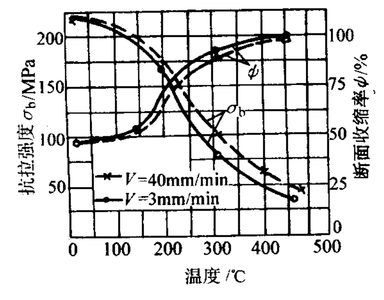


图 6.3-10　7A04 力学性能与温度的关系[12]

（试样经 410℃保温 3 h，炉冷退火）

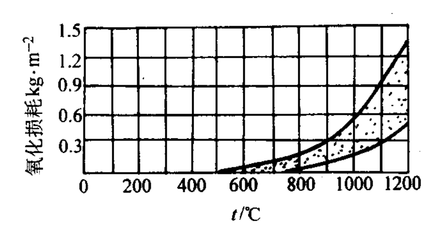


图 6.3-11　15 钢在加热中的氧化情况

3）温锻温度对产品性能的影响。关于在蓝脆温度温锻对产品性能的影响前已叙述。至于温锻产品的力学性能，将在本章第 6 节专门讨论。这里只举一个例子，说明选择温锻温度时，必须考虑对产品性能的影响。例如，奥氏体不锈钢 Cr18Ni9 在 500～800℃加热时，过饱和固溶体中的 C 和 Cr 结合形成 Cr23C6 从晶界析出，会影响产品的抗晶间腐蚀性能。当然，如在变形以后进行固溶处理，可以提高抗蚀性，但也失去了温锻的某些优点。

4）其他。在选择温锻温度时，还需要考虑使模具承受的单位压力不要超过 2 000 MPa。此外，还要对车间设备吨位、产品尺寸公差等级和表面粗糙度要求等作综合考虑。常用温锻温度如表 6.3-4 所示。

表 6.3-4　各种材料的常用温锻温度

材料	温锻温度/℃
碳钢、低合金钢、工具钢等	600～800
奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti	250～350 或 500～800
马氏体不锈钢 2Cr13、4Cr13、Cr17Ni2	600～800
高温合金 GH140	300～400
纯铝	250～350
铝合金 2A12 和 7A04	300～425
铜和铜合金	300～350
镁和镁合金	175～390
钛和钛合金	260～650

1.4　加热方式的选择

温锻成形应用较普遍的是电加热方法，有电阻和感应加热两种。

对短而粗的长径比小于 5 的坯料适于感应加热，长径比较大的坯料或盘条，通过输送辊进行加热。目前连续电阻式加热炉由于连续生产，通过控制炉温及坯料通过的时间，可



较准确控制坯料温度，效果也较好。

温锻成形过程采用中频感应加热较普遍，其主要优点是加热时间短，生产连续，有节奏，氧化少，温度控制准确，易于实现生产自动化，占地面积小，劳动条件好，环境清洁等。

2 温锻的准备

2.1 毛坯的准备

温锻的变形工序基本上与冷锻类似，温锻的必备工序有一部分也与冷锻类似。本节仅就与冷锻准备工序不同的地方加以阐明。

与冷锻一样，坯料体积可按变形前后体积不变假设计算。

为保证产品质量和模具寿命，坯料直径尺寸应接近凹模模腔直径，但要考虑坯料加热后直径的膨胀，否则坯料加热后放不进凹模模腔。

坯料加热后的直径 D，可按下式计算：

$$D_t = D_0\ (1+\alpha t)$$

式中，D_0 为室温下的坯料直径，mm；α 为线膨胀系数，1/℃；t 为坯料温度高于室温的温差，℃。

坯料尺寸决定后，坯料高度可按下式计算：

$$H=\frac{V}{F_0}$$

式中，H_0 为室温下的坯料高度，mm；V 为坯料体积，mm^3；F_0 为坯料横截面积，mm^2。

坯料的下料方法常用剪切、车削和锯切等方法。

常用温锻钢材的线胀系数如表 6.3-5 所示。

表 6.3-5 温锻常用钢材的线胀系数

材料	线胀系数 $\alpha/10^{-6}K^{-1}$
钢 10，20，30，40，50	13.5～14.3
20Cr	13.6
18CrMnTi	13.8
1Cr13	12
1Cr18Ni9Ti	17.6
GCr15	13.6

2.2 坯料加热、模具预热和坯料润滑

为了准确控制加工温度就能保证产品尺寸的一致性。温锻应该采用煤气加热、接触电阻加热，中频感应加热或一般电炉加热。一般不采用油炉加热。

模具在温锻前应进行预热，以免造成模具损坏和工件开裂。模具预热的方法有在模具上安装专门的电阻预热器，或者可用喷灯或在模具上悬放烧红的钢块进行预热。模具预热温度（指凸、凹模，顶杆等工作部分）可在 150～300℃左右，视温锻坯料温度高低而定。必要时可用半导体表面温度计测量模具工作表面温度。

温锻时润滑的好坏，对产品表面质量、模具寿命有很大的影响。由于温锻这种成形方法的特点，对润滑剂有下列要求。

1）可耐 2 000 MPa 以上的高压。

2）能覆盖温锻时形成的大片新生表面。

3）尽量保持低的摩擦系数。

4）适合大约 800℃以下的加热范围，要求在这温度范围内性能不产生变化，就是说保持稳定性。

5）在加热温度范围内，有足够的黏度和附着性能。

6）在温锻时能防止金属质点黏附到模具上（黏附现象）。

这最后一点是最重要的要求。它与摩擦系数相比，摩擦系数的大小就成为次要的。因为润滑剂摩擦系数的变化一般最多影响负荷的 10%左右，而产生黏附现象则会使成形负荷大幅度地增加。非但如此，而且也使温锻产品质量没有保证，模具寿命降低。

在室温下冷锻和冷挤压时，一般对钢的润滑方法是将坯料表面进行磷酸盐处理，然后进行皂化处理。但当温度在 250～300℃以上时，由于磷化层与皂化层被烧坏，使润滑条件恶化，所以在 260～300℃以上温锻时，这种润滑方法便不能使用。目前温锻用的润滑剂还不像冷锻用的润滑剂那样成熟。

摩擦系数高低和黏附现象之间没有相应的联系。试验表明，有时可能摩擦系数较高的润滑剂反而在温锻时能防止粘模。润滑剂摩擦系数开始剧增的温度与温锻时黏附开始形成的温度也不一定一致。因此仅仅用润滑剂的摩擦系数的高低来预测在温锻时的润滑效果是完全不行的，必须通过实际温锻成形试验最后综合判断润滑剂的优劣。

温锻实用润滑剂的选择可以根据国内外的生产实践，推荐在不同情况下使用表 6.3-6 所示的各种润滑剂。

表 6.3-6 温锻实用润滑剂

润滑剂成分或名称	适用范围	备注
水基石墨或油基石墨润滑剂	在 800℃以下温锻碳钢、合金钢、工具钢，也可用于有色金属温锻	商业温锻石墨润滑剂常加入改善石墨润滑或抗氧化性能的其他成分
石墨＋二硫化钼＋油酸（26:17:57）（质量比）	在 800℃以下温锻碳钢、合金钢、工具钢等	工作时发出呛味，劳动条件差
氧化铅（用油调和）	在 400℃以上温锻不锈钢	因有毒，不建议使用
氧化硼（B_2O_3）＋25%（质量分数）石墨或氧化硼＋33%（质量分数）二硫化钼	在 600℃以上温锻碳钢，合金钢和不锈钢	最好将坯料预热在 600℃左右，然后涂上混合的润滑剂粉末
玻璃润滑剂： 29%～48%P_2O_5，50%～58%Na_2O，2%～20%Al_2O_3 或 40%～68%P_2O_5，20%～50%Na_2O，2%～10%Al_2O_3（质量分数） 玻璃润滑剂： 石英砂（SiO_3）23%，硼酸（H_3BO_3）41%，红丹粉（Pb_3O_4）30%，氧化铝（Al_2O_3）1.8%，硝酸钠（$NaNO_3$）4.2%（质量分数）	在 400～650℃温锻碳钢、合金钢和不锈钢 在 700～800℃温锻碳钢、合金钢和不锈钢	清理模具困难：涂在坯料上，必须预热坯料至 120℃



续表 6.3-5

润滑剂成分或名称	适用范围	备注
$Na_2B_4O_7 + PbO$ 及 $Na_2B_4O_7 + Bi_2O_3$	500℃以上温锻各种钢，高温合金、精密合金	
氯化石蜡 85% + 二硫化钼 15%	200～380℃左右温锻不锈钢和高温合金	坯料需先经草酸盐处理，也可以先经镀铜或镀镉
铝粉	用于有色金属温锻	

2.3 温锻变形力的确定

（1）影响温锻变形力的因素

影响温锻变形力的因素很多，有材料性能、变形方式（正挤压、反挤压、复合挤压或镦挤等）、变形程度、模具结构、润滑剂种类以及加热温度等。除了加热温度外，前面各点与冷锻或冷挤压时是类似的。试验表明，在复合挤压时，当加热到 150～200℃时，往往单位压力减少 10%。反挤压时，加热到 100～200℃时，单位压力减少 20%～40%（对钢）。冷锻困难的材料在温挤压时，即使变形程度高达 60%～70%时，挤压单位压力还不大，Si－Cr 阀门钢、Cr 不锈钢和马氏体 Cr－Ni 不锈钢，当变形程度为 60%～70%时，加热温度为 500℃时，挤压单位压力小于 2 500 MPa；当加热温度为 600℃时，挤压单位压力小于或等于 2 000 MPa。

在一般情况下，低温温挤压可减少变形力 15%，中温温挤压及高温温挤压可使变形抗力减少到室温时的 1/4～1/2。可见，温挤压的变形力比冷挤压时有显著下降，对冷作硬化敏感的材料效果更为明显。

图 6.3-12 是在不同温度下正挤压的“负荷－行程曲线”。由图可见，曲线的倾向几乎一致。随着加热温度的增加，挤出零件需要的负荷减少。在挤压的稳定阶段（即除开始阶段以外），挤压变形力的大小几乎与行程无关。由于本图所示的试验为正挤压，故随行程增加，挤压力略有下降，这主要是由于坯料与模具的接触面积逐渐减少，因而摩擦力减少之故。

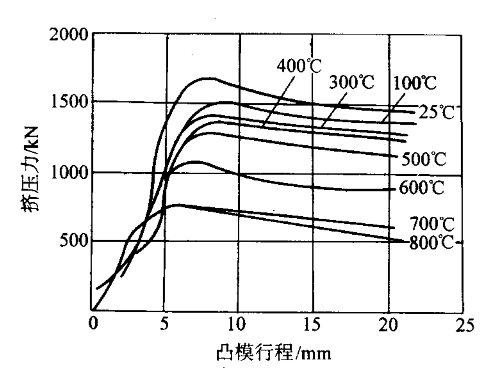


图 6.3-12 在各温度下正挤压的负荷－行程曲线图

反挤压的试验也表明，除了挤压开始阶段以外，反挤压的稳定阶段，挤压力大小几乎与行程无关。

图 6.3-13 示出材料的种类对变形力的影响。由图可见，低碳钢（15 钢）的挤压力比合金钢低，随着钢中合金元素量的增多，温挤压变形力也增加。另外，随着变形温度的提高，变形力也有所降低。只有轴承钢 GCr15 在 750℃以上温挤压时，由于相的转变变形力有回升现象。

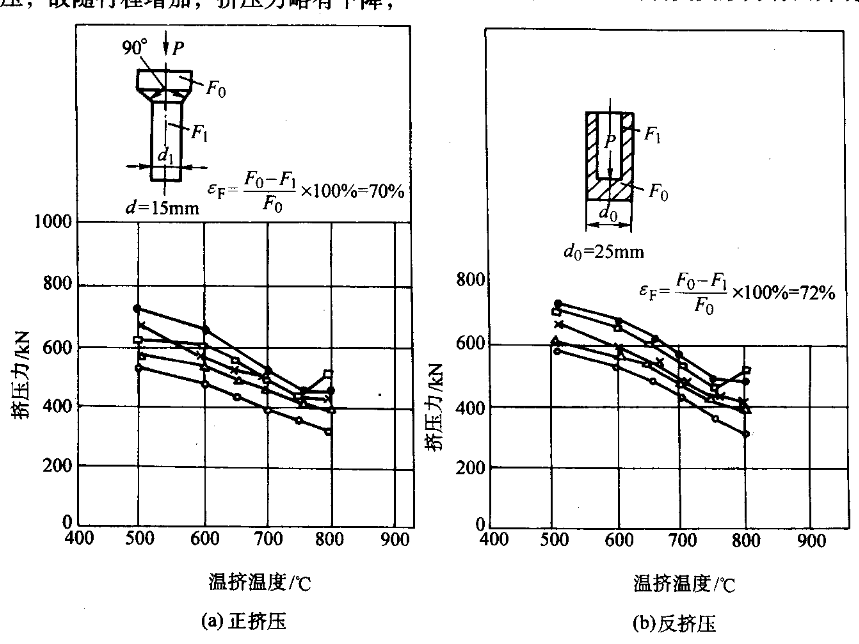


图 6.3-13 不同钢种在不同条件下的变形力变化

○—钢 15；△—20CrMn；×—15CrNi6（德国）；□—GCr15；●—42CrMo

温锻时润滑的好坏，除对产品表面质量、模具寿命有很大的影响之外，润滑剂可使温锻力有所变化。温锻轴承钢时，复合挤压变形程度 70%左右，加工温度 700℃时，使用十种温锻润滑剂时各自对单位挤压力的影响。使用油酸 57% + 石墨 26% + 二硫化钼 17%、水基石墨、油基石墨和玻璃粉作为润滑剂时，单位挤压力最低；而使用机油 + 滑石粉（质量比 1:1）、热锻润滑剂和硼砂 + 三氧化二铋作润滑剂时，单位挤压力最高。但结果发现温挤压单位挤压力的波

动幅度只在10%～15%左右。

（2）温挤压变形力的计算

1）温挤压压力的图算法。图6.3-14示出钢温挤压时最大凹模压力与最大凸模压力的计算图表。图中虚线上的箭头表明了查图的方法。

例如，当加工温度550℃挤压钢35时，可沿图中550℃向上虚线交到钢35的曲线上，然后箭头向左标到正挤压断面缩减率80%曲线上的一点，这一点在水平轴上的投影数据为1 900 MPa，这就是钢35在550℃作80%正挤压变形程度时的单位挤压力（最大凹模压力）。如果是反挤压，则箭头向右标去，同样可查到某一断面缩减率时的单位挤压力（最大凸模压力）数据。图中断面缩减率40%与60%的曲线相当接近，说明在60%以下，断面缩减率的大小对单位挤压力的影响不太显著。

图中的中部曲线是各种材料的平均流动应力曲线。采用的钢种共12种，其他钢种的流动应力，可以和这12种钢比较近似地推断出来。

图中轴承钢GCr15的曲线比较特殊，它在700～800℃温挤压时单位挤压力几乎保持不变，只有当加工温度大于850℃以后，单位挤压力才有所下降。因为，在800℃时，GCr15钢的渗碳体球状组织变为片状组织。试验所用正挤压凹模锥角为120°，反挤压凸模锥角176°（无平底部分）。试验时所用坯料，除GCr15是经球状化退火的以外，其余坯料都是热轧材料。试验在曲柄压力机上进行。模具在60～100℃预热。电炉加热坯料。润滑剂使用以油为介质的石墨胶质溶液，涂刷在模具上。加工温度在600℃以下者，坯料作磷酸盐表面处理。在600℃以上者，坯料不做预先表面处理。

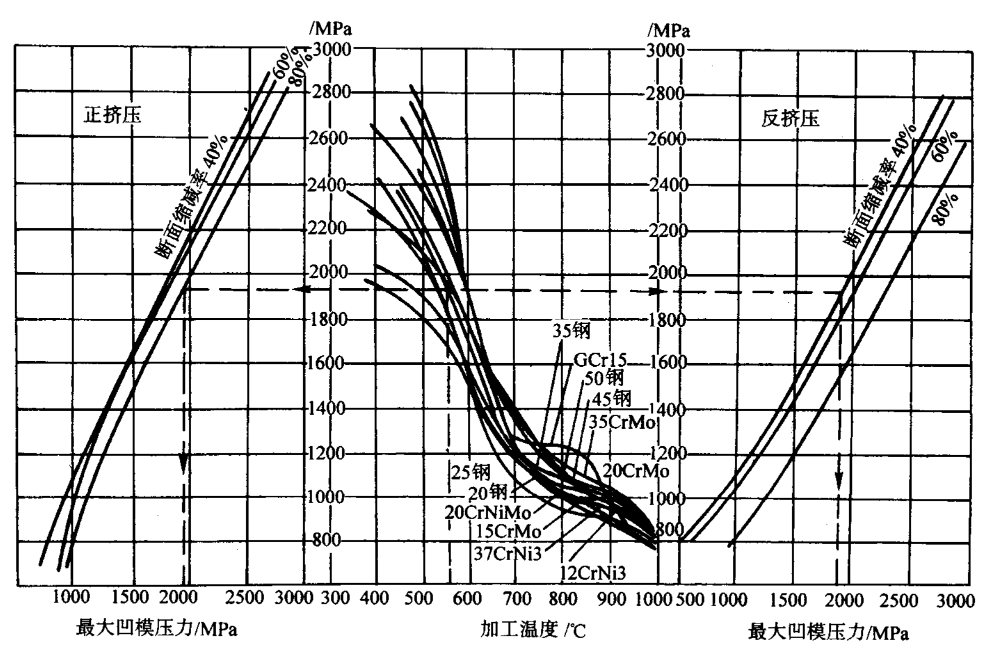


图6.3-14 钢温挤压（正挤压和反挤压）时最大凹模单位压力和最大凸模单位压力的计算图表

关于正挤压：最大凹模压力 P_d（MPa）

$$P_D = \frac{P}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d_d^2)}$$

关于反挤压：最大凸模压力 P_p

$$P_p = \frac{P}{\frac{\pi}{4} d_P^2}$$

式中，P 为最大挤压力，N；d_d 为凹模挤出出口的直径，mm；D 为凹模内径，mm；d_p 为凸模直径，mm；

2）温挤压压力经验公式计算法。对于在200～600℃反挤压钢时，凸模单位压力可按下列经验公式计算：

$$P_p = 1\,197w(\mathrm{C}) + 20.48w(\mathrm{Ni}) - 1.26w(\mathrm{Cr}) - 1.58t + 5.67\varepsilon_f + 2\,252$$

式中，P_p 为凸模最大单位压力，MPa；w（C）为碳的质量分数，%；w（Ni）为镍的质量分数，%；w（Cr）为铬的质量分数，%；t 为毛坯加热温度，℃；ε_f 为以断面缩减率表示的变形程度。

这一经验公式的计算结果，误差在10%以内。该式表明，钢的含碳量对挤压压力的影响最大。公式中没有示出含锰量的影响，因为温挤压受锰含量的影响不大。因此含锰的钢种进行温挤压较适宜。

已知凸模最大单位压力，则挤压变形力为

$$P = p_p F_p$$

式中，P 为挤压力，N；F_p 为凸模断面积，mm^2。

3 温锻模具的设计与模具材料

3.1 温锻模具的要求

1）具有抗室温及中温破坏的足够的硬度、强度与韧性。

2）在反复变形力与热的作用下，必须具有高的抗磨损、耐疲劳性能。

3）制造工艺性好，有利于热锻、热处理及切削加工等工艺。

4）工作部分易损零件应简捷可靠地固定，且拆换方便。

5）坯料的送入，零件的卸出要方便，易于实现机械化与自动化。

6）成本低廉，经济效果好。

7）保证操作安全，劳动条件与工作环境好。

为了达到上述各项的基本要求，必须合理地进行模具结构的设计，审慎的选用模具材料、制造及热处理工艺等。

3.2 温锻模具结构

温塑性成形用的模具，要能承受温塑性成形时引起的较大轴向压力和径向压力，不仅强度高，刚度和精度都能适用



各种成形工序的要求，尤其是模架，要通用性好，便于安装、调整与更换。但实际上，由于压力机型式、规格和变形方式的不同，模具结构也各种各样，且有所差异。目前在生产批量小时，可以采用与冷锻模相同的模具结构。但是在开始温锻以前应使用喷灯或在模具工作部分悬放烧红的钢块进行预热，使工作部分约具有 150～300℃的温度。

较典型的温锻模具的另一种结构如图 6.3-15 所示，是使用另一种方法预热凹模，即用单独的电加热器（件 7）预热凹模。它除了预热以外，还可保证凹模温度稳定在一定范围以内。生产批量大时，必须在温锻模结构上设计有冷却系统。

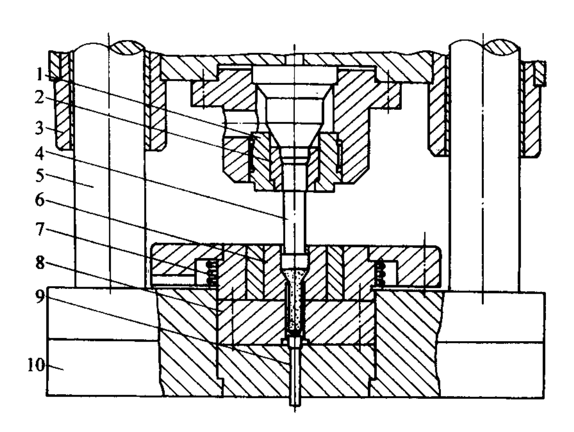


图 6.3-15　正挤压温锻模具结构

1—凸模紧固圈；2—定位压紧圈；3—导套；4—凸模；5—导柱；6—凹模；7—加热器；8—垫板；9—顶杆；10—下模板

图 6.3-16 示出了带有冷却系统的温锻模结构。上模板 1 与下垫板 14 通过导柱 7 和导套 8 导向连接。为了保证凸模 4 和凹模 10 具有较高的同心度，配置了凸模垫板 3 和凹模支撑圈 11。为使挤压后零件从凹模中顶出，可通过顶件器经顶销 15、16 和 13 进行。为把停留在凸模上的零件卸下，通过卸料板 9 和镶块 5 实现。温锻时由于热坯料的热传导，凹模温度会升高，可用冷却水通过支撑圈 11 和固定外套 12 之

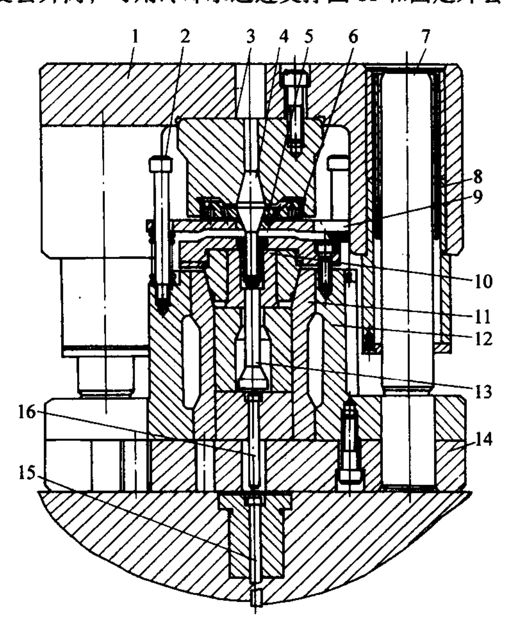


图 6.3-16　带有冷却系统的温锻模结构

1—上模板；2—螺钉；3—垫板；4—凸模；5—镶块；6—压紧螺母；7—导柱；8—导套；9—卸料板；10—凹模；11—支撑圈；12—固定外套；13、15、16—顶销；14—下垫板

间的空隙流过。凸模的冷却，可用压缩空气通过压紧螺母 6 中的通道流过。这样可以保证温锻模具工作部分在较稳定的温度范围内工作。

3.3　凸凹模工作部分的设计

钢温正挤压用凹模如图 6.3-17 所示。其圆锥部分与工作带部分的圆角 r，根据温度的高低，取 $r=1\sim4$ mm（当挤压温度高时，取较大值）。工作带长度 h_1 取 3～5 mm。就是说，这些值一般比冷挤压时稍大。D_2 比 d_1 大 0.2～0.4 mm。

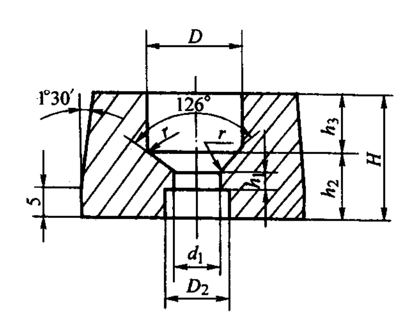


图 6.3-17　正挤凹模

反挤压凸模的设计一般如图 6.3-18 所示。其工作带高度 S 取 3～5 mm，其值比冷挤压时稍大。d 比 d_0 值大 0.6～1.2 mm，其值也比冷挤压时稍大。为了有利于金属流动，尽量使凸模端面应有一段斜面，其斜度取 5°～10°为好。圆角部分 R 与 R'值，在满足零件要求的前提下，应尽可能大些。一般不能取 1 mm 以下，例如可取 2～3 mm。凸模的长度与直径的比，在单位挤压力大时，应≤2.5～3（对钢），以增加其稳定性凸凹模工作部分粗糙度应尽量低些，一般要求表面粗糙度 R_a0.10～0.6 μm。转角均应光滑过渡。降低表面粗糙度不仅可以降低挤压力，而且可以减少应力集中和提高模具抗疲劳破坏的能力。所以，反挤压凸模的非工作部分表面一般也要求粗糙度 R_a1.25 μm 左右。

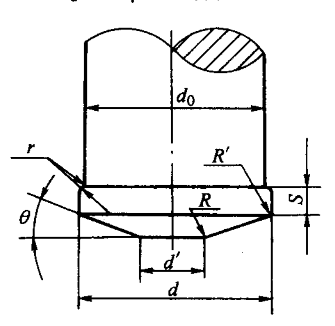


图 6.3-18　反挤凸模

3.4　温锻模具工作部分材料的选择

对温锻模具工作部分的材料主要有下列要求。

1）模具在温升以后，材料的屈服强度应高于温锻时作用在模具工作部分上的单位压力。

2）材料应具有足够的耐磨性，特别是高温耐磨性。

3）材料应有足够的韧性，以便防止裂纹产生。

此外，希望热膨胀率要小，热导率大，比热容大。

目前根据工作条件将模具材料分为冷作模具、热作模具和塑料模具三大类。完全适合温锻的模具材料还没有，但可以根据条件在冷锻模具钢和热锻模具钢中选取（表 6.3-7）。

在 200～400℃范围内温锻时，可以采用与冷锻相同的材料，如 Cr12MoV 以及高速钢 W18Cr4V、W6M05Cr4V2、6W6M05Cr4V 等均能使用。在 400℃以上温锻时，由于 Cr12MoV，在

表 6.3-7 温锻模具材料

模具材料	淬火温度/℃	回火温度/℃	使用硬度 HRC
Cr12MoV	1 000～1 050（空冷）	450～550	55～58
W18Cr4V	1 200～1 240（油冷）	550～700	50～63
W6Mo5Cr4V2	1 160～1 270（油冷）	550～680	50～63
3Cr2W8V	1 130～1 150（油冷）	550～600	46～50
5CrNiMo	830～870（油冷）	450～570	45～50

400～500℃以上，它的力学性能急剧下降，故不能采用。热锻模具钢 5CrNiMo、3Cr2W8V 之类也不适合作温锻模具，它们的强度不高，容易回火软化，因而容易引起磨损和局部变形，使零件表面粗糙。但因韧性好，故在 700～800℃温锻时，有时采用热锻模钢作为温锻模具材料，但这时允许单位压力限制在 1 100 MPa 以下（当用铬工具钢和高速工具钢时，允许单位压力值为 2 000 MPa）。当单位压力低时，它们往往可得好的效果。因为温锻模具不像热锻模具那样剧热剧冷，热裂纹很少产生。所以一般可以采用高速工具钢作为温锻模具材料。

随着模具技术的发展，为了适应不同模具的特殊性能要求，近年来各国不断开发了许多新型模具材料，这些也都可以应用于温锻中。例如基体钢（65Nb 钢）、5Cr 型热作模具钢（H18 钢和 H11 钢等）。

凸模在较高温度温锻时，温度可能升至 400～430℃。高速钢淬火回火后在室温时的硬度为 830HV，如升至 430℃以后，硬度会降低至 720HV。这就是使模具在实际生产中会迅速磨损的重要原因。为了使模具在温锻过程中一直保持适当的温度，在开始设计模具时就应把冷却方法作为一项重要因素来考虑。

对温锻模具材料的碳化物偏析要求、热处理工艺要求等可以参照对冷锻模具材料的要求。

3.5 温锻模具的冷却方法

模具在 550～600℃以上连续工作时，硬度急剧下降，强度显著降低，从而影响模具寿命。如能使模具的工作部分温度保持在 200℃左右，就可以进行连续生产而不失去原有的性能。

在小量生产时，可以在每次温锻以后，用压缩空气冷却凸、凹模等工作部分，并增加每次温锻之间的间隔时间。在大量生产时，必须采用专门措施来冷却模具。对模具进行冷却的方法如下。

1）在压力机连续生产时，不是每一次行程都送料，而是隔一次行程送一个坯料，这样就可以有充分的时间使模具冷却。

2）在模具内开孔加强模内冷却。用泵将压力为 0.12～0.14 MPa 的润滑剂打进模具内的孔道进行流放以冷却凸模；而向凹模则吹送压力为 0.4～0.5 MPa 的压缩空气以冷却凹模和顶件器。

3）对模具进行喷雾冷却。由于温锻过程中，凸模温度升高，如仅利用模具内的开孔流放冷却润滑剂，则因水分蒸发很快，润滑剂流不到凸模的下端（见图 6.3-19），因此当压力机滑块回到上死点附近时还要用喷嘴对凸凹模进行喷雾冷却。

上述三种方法通常是联合使用的。可用接触温度计或红外线温度计测量模具的实际温度，同时调节冷却润滑剂的流量和喷射量，以使模具稳定在 200～300℃，从而就可以进行连续的自动生产。

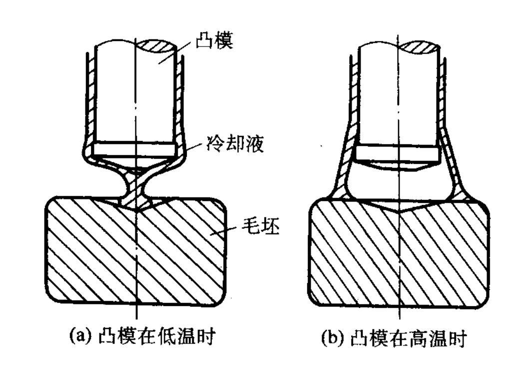


图 6.3-19 沿着凸模流放的润滑剂

4 温锻产品质量控制

4.1 温锻产品的尺寸精度

（1）影响温锻产品尺寸精度的因素

影响温锻产品尺寸精度的因素主要是模具的弹性变形、设备的弹性变形以及模具的磨损。其次还有产品冷却后的收缩和氧化膜的存在。

准确地控制加热温度，对尺寸精度影响很大。例如 45 钢在 700℃时，如果温度波动 50℃，则由于收缩，尺寸就有 ±0.001 mm/mm 的变化，这就相当于 1/3～1/5 的冷挤压尺寸公差。在 700～800℃，由于钢有相变，故热膨胀曲线有变化，从而抵消了部分冷却收缩量。在温度低于 800℃时，氧化膜对尺寸精度的影响不大。因此，产品尺寸一般与上述这些因素之间存在下列关系。

反挤压时：

产品外径 = 经预热的凹模内径 + 由于挤压力产生的凹模内径的增大量 - 冷却时产品外径的收缩量

产品内径 = 凸模直径 + 由于挤压力产生的凸模直径的增加量 - 冷却时产品内径的收缩量

正挤压时：

产品直径 = 经预热的凹模内腔直径 + 由于挤压力产生的凹模内腔直径的增加量 - 冷却时产品直径的收缩量

应当指出，图 6.3-17、图 6.3-18 所示的“算出尺寸”仅仅考虑了冷却时产品直径的收缩量。因此算出尺寸与实际测量尺寸相差 0.03～0.05 mm。随着加工温度增高，算出尺寸与实际测量尺寸的相差也增大，这是由于加工温度高时，加压时模具弹性变形增大的缘故。

4.2 宏观尺寸变化规律

图 6.3-20 反映温挤压时沿正挤压件长度方向尺寸的变化。由图可见，室温（20℃）进行冷挤压时，正挤压件杆部直径大于凹模出口工作带部分直径。而在温锻成形时，成形温度为 500～800℃时，杆部直径小于凹模出口工作带直径。

产生的原因是温锻后挤压件冷却收缩。挤压件杆部最大直径出现在杆的前端部分，最小尺寸出现在杆的中部，因杆的中部挤出模口时的温度最高，冷却后收缩量也较大。挤压件根部的直径大于杆的中间部分，这是由于挤压件根部在凹模内停留时间长，冷却较杆的中部多，因而温度较低所致。当 750℃温锻时，挤压件杆部尺寸减少的较少，其原因是钢在 750℃左右，体心立方晶格的 α－铁向面心立方晶格的 γ－铁转变，γ－铁的体积有所减小。随着温锻温度的提高，正挤压件杆部的直径收缩率增大。据实验，45Cr、40Cr 在 600～700℃左右温锻后杆部外径收缩率为 0.4%～1%。

图 6.3-21 示出反挤压时产品尺寸的变化。图中实线或虚线是在不同变形程度下偏差的最大值联线与最小值联线。

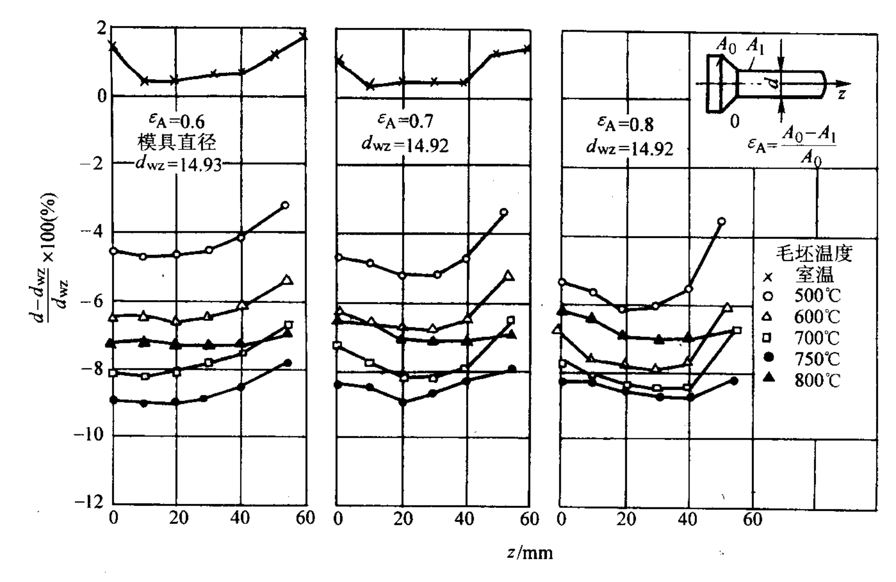


图 6.3-20 温挤压时沿正挤压件长度方向尺寸的变化（20CrMn）

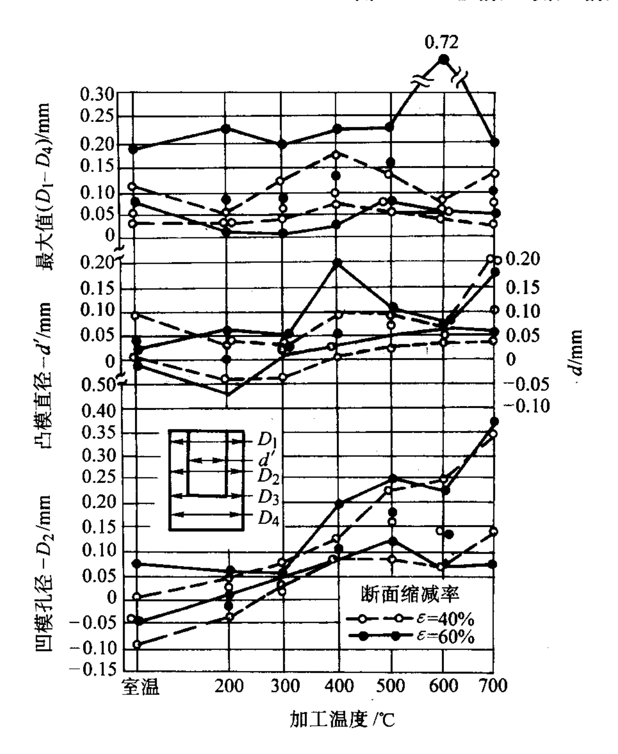


图 6.3-21 温挤压杯形件时的产品尺寸变化

可见，凹模孔径与在挤压产品壁的中部外径 D_2 的差值波动，从加工温度400℃开始急剧增加，而且凸模直径与挤压产品壁的中部内径 d' 的差值波动，也从400℃开始显示增大倾向。而且在400℃以上，挤压产品的壁部形成的鼓形比较显著。

4.3 温锻产品的实用公差

钢在200～800℃温锻时的实用公差如下。

对50 mm以下直径的正挤压件和反挤压件，直径公差不应小于0.1 mm。如果产量较大，直径公差以0.2～0.3 mm为宜。此外，厚度尺寸与温度控制的准确度影响很大，实用公差可取0.4～0.8 mm。外径与孔径的偏心应为0.1～0.3 mm。当小批单件生产时，公差可适当缩小。如果要提高温锻产品精度，需要附加冷整形工序。

4.4 温锻产品的表面粗糙度

温锻产品的表面粗糙度，据对45钢和40Cr的研究，如表6.3-8所示，温锻温度从室温至600℃温度范围内，零件的表面质量基本上相近，具有相似的粗糙度等级，且比变形前坯料的原始表面粗糙度有所降低。一般粗糙度相当 R_a0.4～R_a1.6。由图6.3-24可见，当温锻温度高于700℃以后，工件表面粗糙度增加一般实用表面粗糙度，根据加工温度可定为8～1.5 μm。

表 6.3-8 钢温锻温度与工件表面粗糙度

温锻温度/℃	表面粗糙度 R_a/μm	备注
室温	0.7～1.3	1）原始坯料表面粗糙度 R_a 为4.4～4.7 μm 2）测试用轮廓仪
300	0.4～1.5	
350	0.5～1.7	
400	0.5～1.65	
500	0.4～1.25	
600	0.7～1.3	

4.5 温锻产品的显微组织变化

在平均应变速率为13～14 s^{-1}、挤压比为4.8～9.2的温挤压时，加热温度为660℃的钢坯料上，温度提高135～180℃。因而可能出现再结晶。在挤出的产品上，沿长度方向材料的平均温度会有变化。同时，沿产品断面上，变形不均匀和变形温度也不均匀。

因而，可能引起沿产品长度和产品断面上，再结晶的程度明显不同，所以，在许多情况下，铁素体基体可能显出，从高度延伸的亚结构晶粒到完全再结晶晶粒这样不同的组织范围，因而晶粒大小也有一个范围。在此钢中，所有的珠光体在高应变和高温度下完全球化。

4.6 温锻产品的力学性能

研究表明，温锻温度增加，产品的韧性和塑性增加而强度下降。在一定的温锻温度下，随着变形程度增加，则产品的强度增加而塑性降低。一般挤压的应变都较大，在回复的显微组织内会明显地出现织构。严重的纤维织构会明显地影响韧性并呈现方向性。

（1）硬度

温挤压后产品的硬度，无论沿轴向长度方向，还是沿横断面上，硬度分布都极不均匀。当20CrMn钢变形程度 ε_f 为

60%时，从图 6.3-22 看出在不同温度变形后硬度分布情况。挤压温度愈低，由于加工硬化严重，因而挤压件硬度愈高。在肩部以前未变形的部分，硬度已经提高很多。在杆的肩部端头的硬度大致相当于杆部大部分长度上的硬度。值得注意的是，在冷挤压和在 500℃挤压后的产品硬度相差不多。沿挤压件横截面的硬度分布都是外层硬度高而中心部位硬度低，而且边部与中心处的硬度值相差 HV20 左右。

在图 6.3-22 的示例中，在冷挤压后，产品硬度约为坯料硬度的 1.75 倍（坯料硬度 149HV）。而在坯料温度 500℃时，则产品硬度约为坯料硬度的 1.6 倍；800℃时，则为 1.2 倍。

（2）拉伸试验得到的力学性能

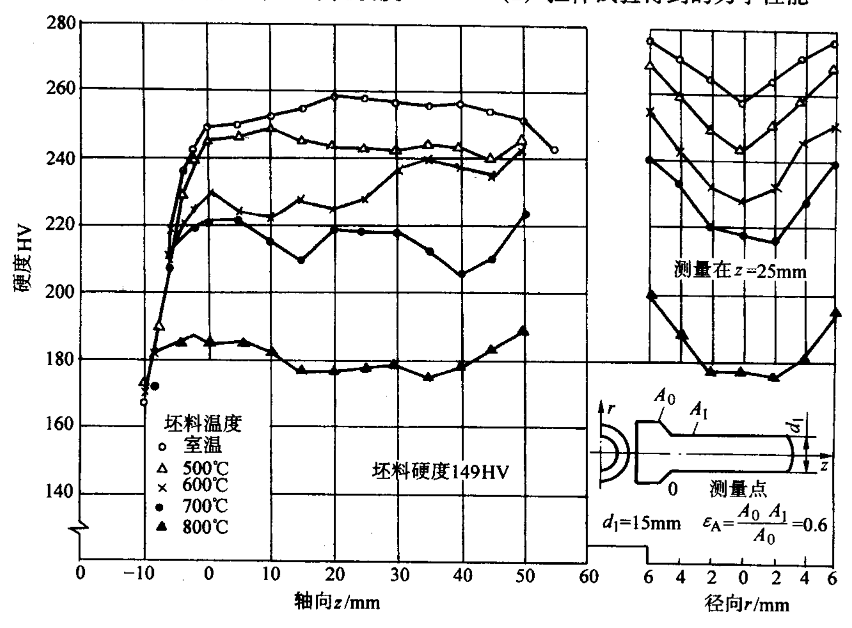


图 6.3-22　20CrMn 钢温挤压后产品的硬度分布

图 6.3-23 显示 20CrMn 钢温挤压后产品的力学性能。随着坯料温度增加，抗拉强度 σ_b 减小，而在 750℃左右，强度极限值最小。高于 750℃，抗拉强度继续增加，因为这时变形发生在相变区。当 500℃变形时，抗拉强度与屈服极限相当接近。然而随着坯料温度的增加，它们的差值增加。因而，随着坯料温度增加，$\sigma_{0.2}/\sigma_b$ 减小；在大约 750℃时，此值下降增快（图 6.3-24），图 6.3-23 同时也显示该钢温挤压产品颈缩出现时的延伸率 δ_g 和破坏时的延伸率 δ_5 以及破坏时的断面缩减率 ψ 的变化。由图可见，随着坯料温度增加，这些指标上升。同样，在 750℃以上除外。

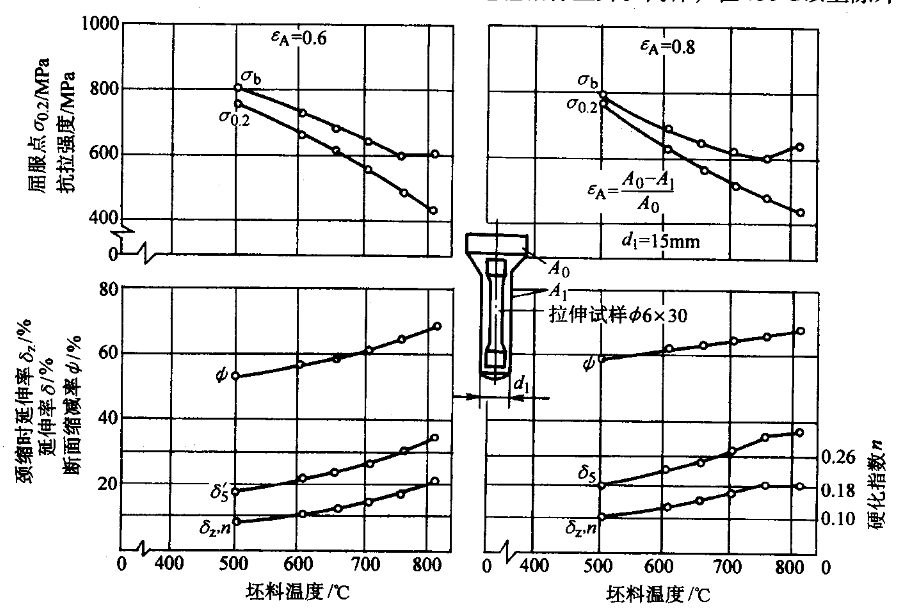


图 6.3-23　20CrMn 钢温挤压产品的力学性能

（变形程度 ε_F = 60%和 80%）

（3）冲击韧度 a_K

20CrMn 退火坯料的冲击韧度为 165J/cm²。图 6.3-25 显示出温挤压产品冲击韧度的变化。最大的冲击韧度出现在坯料挤压温度高的挤压产品（800℃）。有资料表明，钢坯料温度高于 750～800℃时，冲击韧度剧烈下降，甚至有时低于坯料的原冲击韧度，这是由于变形发生在相变温度区之故。根据各种试验以及生产实践经验，对温挤压钢的产品的力学性能可以得到以下近似结论，即：温挤压钢时，当温挤压温度在 200～400℃时，温挤压产品的力学性能与同等变形程度时的冷挤压产品相近；而在温挤压温度在 400～850℃时，温挤

压产品的抗拉强度、屈服点为退火产品的 1.1 ~ 1.5 倍。

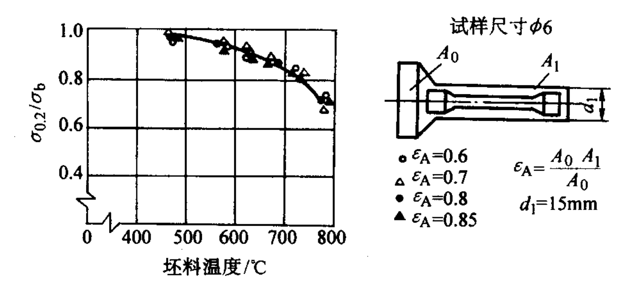


图 6.3-24 20CrMn 钢温挤压产品屈强比（$\sigma_{0.2}/\sigma_b$）随温挤压温度的变化

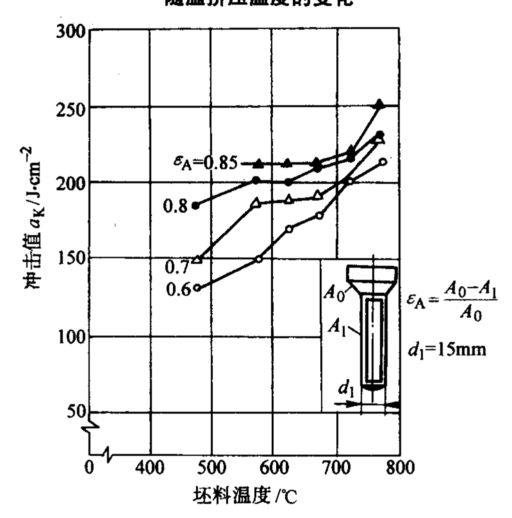


图 6.3-25 20CrMn 钢温挤压产品的冲击韧度与坯料加热温度的关系

5 温锻的应用实例

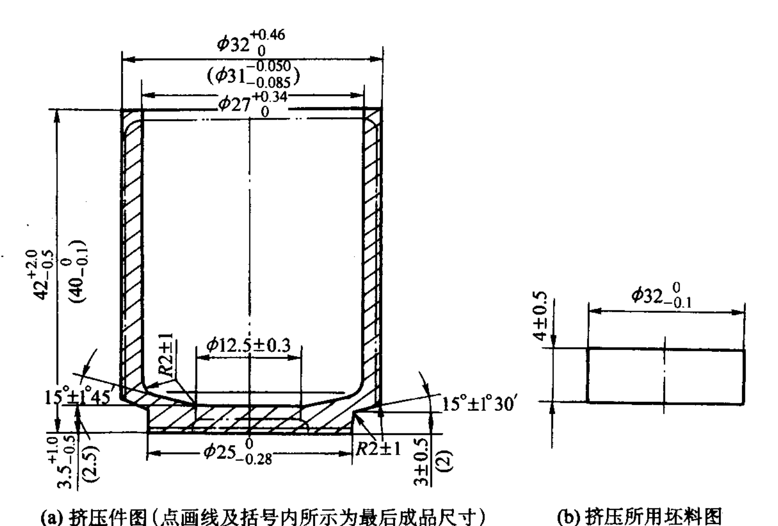
5.1 碳素结构钢的温锻

图 6.3-26 所显示的是 45 钢温挤压杯套零件图。45 钢变形抗力较大，进行冷挤压常受模具强度的限制。根据试验，冷反挤压 45 钢，当变形程度 40% 时，凸模单位压力已达 2 300 MPa；变形程度 60% 时，则达到 2 500 MPa[8]。由此可见，使用温挤压，对 45 钢较为合适。

图 6.3-26 所示杯套零件原生产工艺是机械切削加工，不仅生产效率不高，而且材料利用率也低。挤压原材料采用冷拉钢，材料直径 ϕ32 mm，高 14 mm（图 6.3-26b 所示）。挤压后产品内孔可不再加工，外圆稍经磨削，即可达到产品要求。实际上，内孔表面粗糙度 R_a 为 1 μm 左右，外圆表面粗糙度 R_a 为 2 μm 左右。挤压在 2 500 kN 曲柄压力机上进行。反挤压变形程度 71%。

45 钢在各种温度时的力学性能，已示于图 6.3-4。由图可见，在 650℃ 以上，45 钢的抗拉强度 σ_b 已经降至 100 ~ 200 MPa。45 钢在各种温度下反挤压单位压力如图 6.3-27 所示。

根据凸模材料的承载能力，45 钢温挤温度一般应高于 650℃。如在 700 ~ 800℃ 温挤压，则可以得到更低的挤压单位压力。为了避免氧化、脱碳严重，温挤压温度一般也不应高于 800℃。根据试验，在 650 ~ 800℃ 范围内挤压，挤压件表面光滑，没有出现明显的新的脱碳层。挤压后材料硬度比坯料退火后的硬度提高不到 1 倍，对直接切削挤压出的零件无不良影响[8]。因此选择温挤压温度范围在 650 ~ 800℃。钢 45 在上述温度范围内挤压，在挤压前不需进行毛坯软化退火。采用石墨加机油（或汽缸油）作为润滑剂，将润滑剂涂在模具上。



(a) 挤压件图（点画线及括号内所示为最后成品尺寸） (b) 挤压所用坯料图

图 6.3-26 钢 45 杯套挤压件及其所用坯料

5.2 合金结构钢的温锻

20Cr 钢活塞销温挤压用坯料与挤压件图如图 6.3-28 所示。活塞销是内燃机的重要零件。过去生产采用 20Cr 钢实心棒料车削加工和钻孔工序，有的也用无缝钢管加工。材料利用率仅达 40% ~ 60% 左右，改用温挤压成形后，材料利用率可提高到 80% 以上，生产效率也提高 5 倍左右。采用 20Cr 钢温挤压的工艺流程如下：

剪切下料→平端面、倒角、磨外圆→浸涂润滑剂→中频感应加热→温挤压→检验。

浸涂润滑剂前需将坯料预热至 80 ~ 120℃，润滑剂使用商业水基石墨润滑剂，每只坯料表面浸涂润滑剂的量平均为 0.5 g 左右。然后送入中频感应加热器内加热，加热温度控制在 650℃ ± 10℃ 左右。工作频率 2 500 Hz，功率为 100 kW。加热时间 3 min 即可使直径为 35.5 mm 的坯料内外温度一致。所用模具具有冷却装置。在下凹模和上凸模上设有通道，通入压力为 30 ~ 50 MPa 的压缩空气进行冷却，同时将模腔内的润滑剂残渣吹掉；上凸模是利用装在卸料板上的空气冷却装置定时冷却，由压缩空气通过电磁滑阀控制，当挤压变形完成后，同时对凸模和凹模进行冷却。由于采用了冷却装



置，模具寿命由原来的几千件提高到几万件。

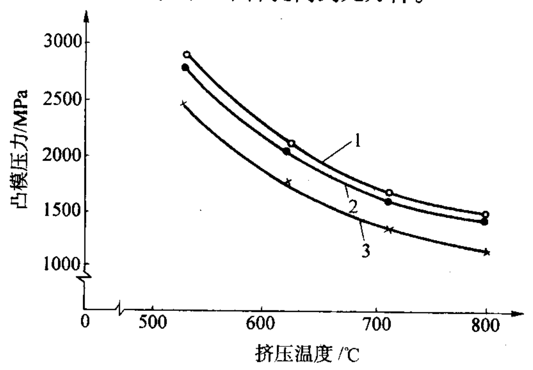


图 6.3-27 钢 45 的反挤压凸模单位压力和温挤压温度的关系曲线[8]

1—变形 80%；2—变形 51%；3—变形 30.6%

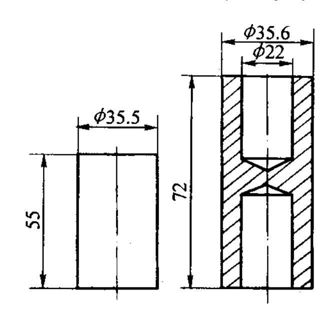


图 6.3-28 活塞销温挤压坯料与挤压件图

该件温挤压后，尺寸精度可达 0.07 mm 以下。表面粗糙度 R_a0.35 ~ R_a2.5。壁厚差可控制在 0.2 mm 以下。活塞销纵断面硬度分布如图 6.3-29 所示。

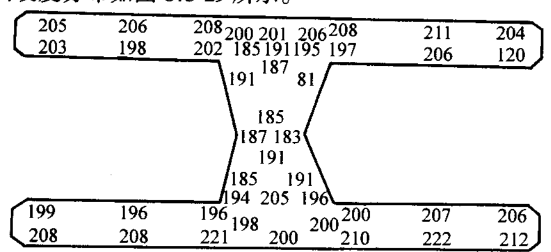


图 6.3-29 活塞销温挤压后硬度（HB 值）分布

由图可见，活塞销温挤压后，外表面硬度略高于内孔表面的硬度，中心连皮处几乎没有改变原始硬度值（坯料原始硬度 185HB）。据报道，温挤压活塞销的疲劳试验结果优于冷挤压同类产品。

5.3 轴承钢的温锻

轴承钢广泛用于机械制造工业，特别是用作轴承套圈。目前，直径 < 140 mm 左右的轴承套圈均可采用冷、温塑性成形工艺进行生产。

（1）轴承钢的流动应力与温度的关系

轴承钢在各变形温度时的流动应力如图 6.3-30 所示。在 450℃左右出现蓝脆区。当变形程度 $\varepsilon = 70\%$ 时，应变速率由 1.5 s^{-1} 提高到 40 s^{-1} 时，流动应力有所提高。

（2）轴承钢 GCr15 温锻温度的选择

如图上所示，GCr15 蓝脆区在 450℃左右。变形温度高于蓝脆区后，随着温度的提高，流动应力不断下降，而且在 600 ~ 700℃之间，下降剧烈。GCr15 的相变区约在 735℃左右开始。因此，高于 750℃以后，变形后在空气中冷却，将形成索氏体组织，碳化物积聚，原始的球化组织被破坏，使挤压件硬度提高，不利于后续机加工序的进行。所以一般温锻

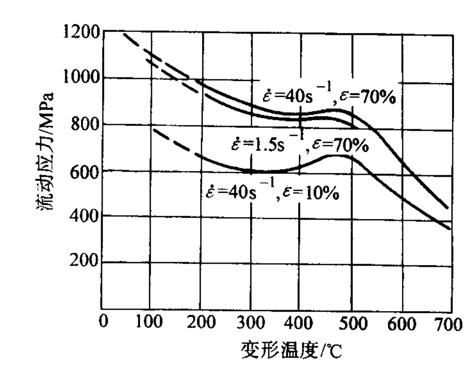


图 6.3-30 GCr15 在各温度时的流动应力

轴承套圈的温度常选在 700℃ ± 20℃左右。在此温度区温锻，挤压件可保持表面光滑，无新的脱碳层出现。变形后，原材料的脱碳层有变薄趋势。因为在低于相变点加工，挤压件硬度一般仅增加 5% ~ 12%，对后续加工无影响，同时也为热处理准备了好的原始组织。GCr15 轴承钢温锻后直接进行机械加工和热处理时，温锻前应采用球化退火处理。对组织已符合国家标准的球化的坯料可不必进行球化退火。

（3）轴承套圈温锻工艺方案

轴承钢棒料经冷剪切下料后，进行镦饼压缩（冷态或温态），继而进行温挤压成形。目前共有六种成形方案，如图 6.3-31 所示。

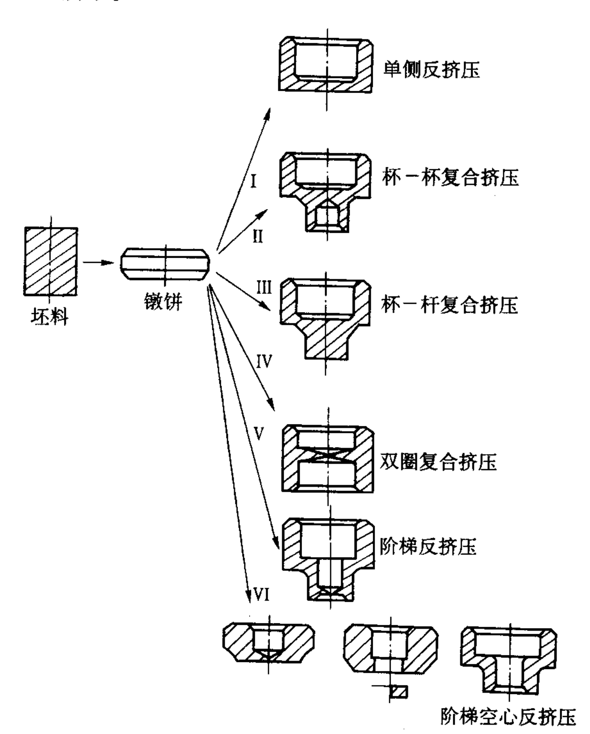


图 6.3-31 轴承套圈温挤压成形方案

第Ⅰ种单圈反挤压成形，模具结构简单。反挤压后冲底，即可供后续加工。但是变形力较高。第Ⅱ种杯-杯型复合挤压成形方案，工厂称之为“塔形”成形工艺，同时可以生产一套轴承套圈坯料，生产效率高，单位挤压力较低。目前国内外应用较多。第Ⅲ种成形方案，单位挤压力最低。对于设备能力不足，温挤压外圈时可以采用。挤压后分离下部实心部分。该部分可以不经再次退火直接进行冷挤压或温挤压内圈。第Ⅳ种方案，在生产上虽未见采用，但是实际上是可行的，可以同时成形两个轴承套圈，废料仅是一个底部，材料利用率较高。第Ⅴ种成形方案，由于前端芯轴容易损坏，因此温锻成形时用得不多。第Ⅵ种成形方案，是目前国



外已经生产使用的一种方案，可降低单位挤压力，对减少能量消耗，提高模具寿命是有利的。挤压时一般均使用石墨系润滑剂。

5.4 不锈钢的温锻

随着航空、石油化工、动力、仪器仪表、汽车、食品、日用品等工业的发展，不锈钢制品的数量也日益增多。不锈钢温锻也不断得到应用。

不锈钢温锻的特点如下。

1）室温流动应力大，而且加工硬化严重不锈钢在室温时具有高的流动应力。此外，不锈钢具有较大的加工硬化。当然，只要正确地选择温锻温度，就可以大大降低流动应力。

2）粘模能力强，金属微粒在温锻时容易黏附到模具上，从而使模具和工件表面造成损伤。如果对温锻润滑处理不当，往往无法进行正常生产。

因此温锻温度的选择以及润滑剂的选择和它的使用方法，特别是润滑剂的选择是顺利地进行不锈钢温锻的关键。

（1）奥氏体不锈钢 1Crl8Ni9Ti 温锻

奥氏体不锈钢 1Crl8Ni9Ti 主仪表零件所用坯料尺寸为 ϕ10 mm × 35 mm。在 350℃温锻时，坯料需经软化热处理（淬火）；而在 650 ~ 850℃温锻时，坯料不经软化热处理。软化热处理规范为在 1 100℃加热 5 ~ 10 min 后在正在沸腾的水中淬火。坯料原始硬度 250HB，淬火后硬度 130HB。

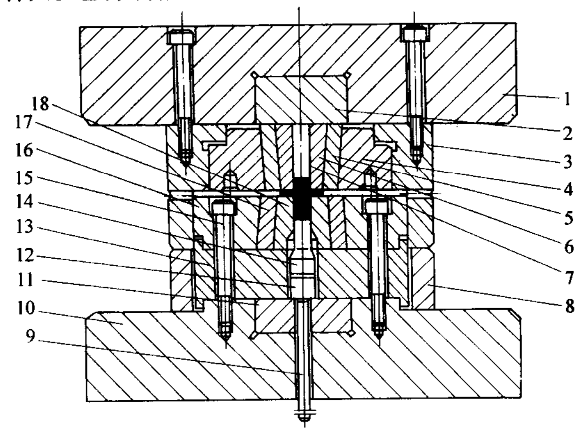


图 6.3-32 温锻模具图

1—上模板；2—上垫板；3—导向套；4—上外预应力圈；5—上内顶应力圈；6—上凹模；7—上凸模；8—限程套；9—顶件器；10—下模板；11—下垫板；12—小垫块；13—固定圈；14—下凸模；15—螺钉；16—下外预应力圈；17—下内预应力圈；18—下凹模

温锻所用模具如图 6.3-32 所示。坯料在马弗炉中加热。温锻在 2 500 kN 液压机上进行。350℃温锻用的坯料，在温锻前需经草酸盐处理。润滑剂采用二硫化钼 15% + 氯化石蜡 85%（质量分数）。但 650 ~ 850℃温锻用的坯料，未经草酸盐处理。采用下列三种润滑剂作为试验，均发现严重黏附现象。

这三种润滑剂是：①二硫化铝 15% + 氯化石蜡 85%；②硼砂 $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ 95% + 三氧化二铋 Bi_2O_3 5%，用汽缸油调和；③氧化硼 $Bi_2O_3$75% + 石墨 25%，用汽缸油调和（以上均为质量分数）。如使用氧化铅 PbO（用汽缸油调和），作为润滑剂，则可明显减少黏附现象。但氧化铅有毒。因此在模具及设备条件允许时，以在 350℃温锻为宜，因为温度较低时，黏附现象会少得多。

为了检查在 650 ~ 850℃加热后是否降低晶间抗蚀性，曾进行晶伺腐蚀试验。将温锻后试件放入检查液中煮沸经 24 小时后，并未发现晶间腐蚀。

（2）马氏体不锈钢 4Cr13 温锻

某 4Cr13 仪表零件的正挤压件图如图件 6.3-33 所示。

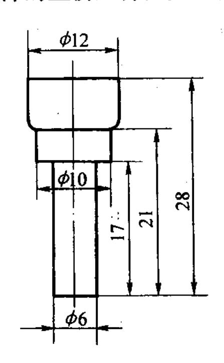


图 6.3-33 4Cr13 正挤压件

坯料尺寸为 ϕ10.5 mm × 22 mm。坯料原始硬度 210HB。退火后，降至 180HB。坯料未经草酸盐处理。使用 2 500 kN 曲柄压力机进行挤压。

采用润滑剂为 90% $Na_2B_4O_7$ + 10% Bi_2O_3（质量分数）和 25%石墨 + 75% Bi_2O_3（质量分数）两种进行试验。将它们分别用水或汽缸油调和，或使用于粉末。将润滑剂涂在冷坯料和经预热的坯料上。

结果发现，将 90% $Na_2B_4O_7$ + 10% Bi_2O_3 润滑剂涂于冷坯料上是不适宜的。因为在冷坯料上很难将它涂得均匀，在加热时，坯料表面的润滑剂就有结块现象。由于使用这种润滑剂，必须经 900℃加热，才能使润滑剂与坯料表层在高温作用下起化学作用，形成一薄层润滑膜。如有结块现象，就会影响润滑效果和产品质量。温锻时采用 90% $Na_2B_4O_7$ + 10% Bi_2O_3 润滑剂可以较好地防止粘模，但是在挤压时容易脱落在模具内，以致划伤模具和零件。所以使用时要注意清理模具。

采用石墨 + Bi_2O_3 作为润滑剂（用油调和）容易涂在冷坯料上。此后，加热室 800℃进行挤压。模具仍涂同种润滑剂，同样可以较好地防止粘模。

编写：黎俊初（南昌航空工业学院）
常 春（南昌航空工业学院）



第 4 章　超塑性模锻与等温模锻

一般金属材料的塑性指标以拉伸试验的伸长率（δ）表示，如黑色金属的伸长率均在 30%～40%的范围内，有色金属及其合金的伸长率，如铝、铜及其合金一般为 50%～60%，即使在高温情况下也难以达到 100%。

然而，在特定的条件下，金属材料却具有奇妙的软化状态和异常高的伸长率，这种性质称为"超塑性"。一般而言，超塑性是指金属在一定的温度范围和一定的组织条件下（微细晶粒或相变过程），以很低的应变速率进行变形时，所呈现的变形抗力小和应变特大的一种特性。这一现象早在 20 世纪初就已经发现，然而直到 1945 年才用"超塑性"一词来描述它。所谓特定的条件包括：金属材料的内在条件，如一定的化学成分、特有的显微组织及转变能力（相变、再结晶及固溶度变化等）；外在条件，如变形速度和变形温度等。在特定的条件下，有的超塑性合金的伸长率（δ）极易达到百分之几百，最大达到 5 000%，所需的拉力却很小。例如：微细晶的 Ti－6Al－4V 合金的伸长率可以超过 1 600%，钢在相变过程中的伸长率可超过 500%。所以又有人将具有超塑性的金属材料称为"金属软糖"或"金属胶"。通常认为伸长率超过 100%的金属材料就是超塑性材料。

除金属材料外，非金属材料，例如陶瓷、有机材料等也会产生超塑性。

超塑性模锻是利用某些金属或合金的上述超塑性特性进行的模锻。超塑性模锻对于毛坯的组织状况，以及变形温度和变形速度都有特殊要求。换言之，变形的金属材料必须具备上述超塑性的内在条件和外在条件。利用金属材料的超塑性进行超塑性模锻，是提高材料的塑性和锻件质量的一种少或无切削加工和精密成形的新工艺。采用超塑性模锻工艺，可获得形状复杂和尺寸较精确的锻件，而且变形力大大降低，可以用小吨位的锻造设备成形较大尺寸的零件，因此超塑性模锻在工业上的应用有着巨大的潜力。

等温模锻是把锻模的温度控制在和毛坯加热温度大致相同的范围内，使毛坯在温度基本不变的条件下完成锻造的全过程。等温模锻对锻造毛坯的组织状况和变形速度没有特殊要求。这种工艺减少或消除了模具激冷和材料应变硬化的影响，不仅变形抗力很小，而且有助于简化成形过程，以及可能生产出满足复杂零件要求的精密锻件。因此，等温模锻具有材料利用率高、机械加工费用少、适用范围广等突出的优越性。

通常情况下，超塑性模锻一定是等温模锻。即，超塑性模锻完全满足等温模锻对毛坯和锻模的等温控制要求。反之，等温模锻一般不是超塑性模锻。因为，等温模锻一般不能满足超塑性模锻对毛坯的组织状况和变形速度的特殊要求。

1　金属超塑性理论基础

1.1　金属的塑性、超塑性

（1）塑性和超塑性

工程上对金属的基本要求是：能加工成形和满足各种性能的要求。因此，金属材料必须具有相应的强度和塑性。在工程上，所谓塑性是指材料在外力作用下既具有永久变形的能力，又具有足够的强度而不遭破坏的性能。从材料的使用角度说，要求它具有足够的强度而不发生永久变形。但从材料的加工成形角度说，就要求它既具有抵抗破坏的足够强度，又要有足够的永久变形的能力。因此，强度和永久变形能力就成为一般工程材料不可缺少的综合性能。

金属材料的塑性与下列因素有关：化学成分及相的状态、压力加工时金属的晶体取向、变形时的应力状态、变形温度和变形速度、组织的均匀性及加工时的周围介质等。所以塑性本身是一种依赖于各种复杂因素而变化的加工性能，很难用一种共同的指标来反映，因为材料的塑性不是固定不变的，同一种材料，在不同的变形条件下，会表现出不同的塑性。

塑性和超塑性材料在拉伸时的行为不同，在一般塑性变形中，随着变形的进行出现加工硬化现象，而超塑性变形没有加工硬化现象；材料的塑性拉伸到一定程度后变形不均匀，在试件某一部位产生缩颈，以至最后呈杯锥断口断裂，而超塑性材料在变形过程中不出现缩颈，最后呈脆性断裂。

由塑性变形时金属材料的典型应力－应变曲线（图 6.4-1）看出：在应力 σ 达到屈服强度 σ_s 之前，σ 与 ε 之间的关系是线性的，遵守虎克定律，称为弹性变形阶段。如果应力相应地增加，并达到某一极限时，σ 与 ε 之间的关系即变为非线性关系，随着变形的增加亦将出现材料的加工硬化现象，要使它继续变形必须增加变形力。产生加工硬化的结果造成塑性下降，随着试件横向尺寸的缩小，有效应力值增大，最后应力点达到峰值点 E。在应力达到峰值点 E 之前，变形属于稳定的塑性变形，试样的截面积均匀减小；当应力超过峰值点 E 后，继续加载变形就进入不稳定阶段，横向尺寸突然急剧缩小，形成缩颈现象，最后试样断裂。真实应力和真应变之间的关系可用下式表示：

$$\sigma = K\varepsilon^n \tag{6.4-1}$$

式中，σ 为真实应力；K 为材料常数；n 为加工硬化指数；ε 为真实应变。

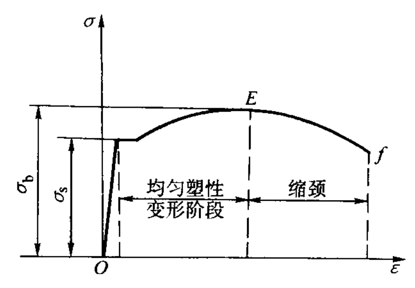


图 6.4-1　金属材料典型应力－应变曲线

如果对上式在数值上（下同）取对数，则为：

$$\lg\sigma = n\lg\varepsilon + \lg K \tag{6.4-2}$$

而 n 就成为一条直线的斜率（图 6.4-2），由于 n 值的不同，

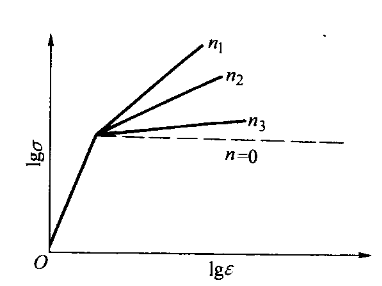


图 6.4-2　应力－应变的对数关系曲线



可得到一系列直线。加工硬化的程度随 n 值的减小而降低。当 $n=0$ 时，加工硬化效果消失，成为理想的塑性材料。上述公式只在稳定的塑性变形阶段有效。

超塑性材料在拉伸变形时，其情况恰好相反：第一，不出现加工硬化，即 $n=0$。在某些情况下的超塑性变形过程，有时也出现加工硬化现象，这是由于发生有限的晶粒长大的结果。由于在超塑性变形中会发生晶粒细化，结果也会出现加工软化现象。第二，在超塑性拉伸变形过程中，从宏观上看，一般不产生局部的缩颈，在整个变形过程中变形都是均匀而稳定的。但实际上，拉伸时并非均匀伸长。第三，超塑性条件下塑性变形的机理明显地区别于一般的塑性变形机理（滑移和孪晶）。在超塑性现象中，起决定作用的是相间附近或晶粒边界附近的变形。而塑性变形主要是通过晶间变形，同时也通过空位和位错的蠕动来实现。为了实现超塑性变形，需要增大多晶体边界层的势能（减小晶粒尺寸而增大晶粒的总表面积）和晶粒结构缺陷（空位，位错）能。

目前超塑性被认为是一种材料固有的属性。可以用四句话来描述：即大伸长率、无缩颈（或小缩颈）、小应力、易成形。

（2）超塑性的种类

在超塑性研究初期，只局限于 Al－Cu 共晶合金和 Zn－Al 共析合金等。这些材料都是在晶粒微细和恒温拉伸的情况下才表现出超塑性的。但随着研究的深入，发现在一定条件下通过同素异形转变、周期性的转变、再结晶过程等都可以得到超塑性。因此，超塑性现象是一般金属或合金的本质性能，是一种普遍的现象。

金属超塑性的分类主要有以下两大类。

1）微细晶粒超塑性（恒温超塑性）。它是在一定的温度（等温）条件下，在变形速度和晶粒度都满足要求的条件下所实现的超塑性。这种超塑性是通过把原材料的晶粒超细化、等轴化及稳定化并在适当的外加条件下产生的超塑性，所以也称为结构超塑性。晶粒细化的程度要求达到 0.5～5 μm，但有的具有较粗晶粒度的材料也能实现超塑性。因为超塑性变形并不全是滑移、孪晶等一般塑性变形机构，而是一种晶界作用，所以要求有数量较多而短的晶粒边界。在这些因素中，晶粒尺寸是主要的影响因素。

微细晶粒超塑性是研究和应用得比较多的一种，其优点是易于操作（恒温）。但也有其缺点，因为晶粒超细化、等轴化及稳定化要受到材料的限制，并不是所有合金都能达到此目的。

2）相变超塑性。具有相变的金属及合金都可以通过相变过程实现超塑性。在一定温度范围内和一定负荷条件下，经过多次的循环相变或同素异形转变，可以获得超塑性。即在一定负荷下，在相变温度范围内循环地进行加热和冷却，试样组织在每一次加热和冷却时都会发生同素异形转变，可以得到一次跳跃式的均匀延伸，多次循环就可得到累积的大延伸。但与微细晶粒超塑性比较，这却是一项操作上的缺点。

相变超塑性的第一个必要条件是金属及合金具有固态结构转变能力；第二个必要条件是应力作用和在转变温度区间循环加热和冷却，从而诱发其产生反复的结构变化，使金属原子发生剧烈运动而出现超塑性。在该过程中，伸长率（ε/周期）与所施加应力成线性关系，这是相变超塑性的一个特有规律。

相变超塑性的主要控制因素是温度幅度（$\Delta t = t_{上} - t_{下}$）和温度循环率（$\Delta t/\tau$，即加热和冷却速度）。相变超塑性的总伸长率与温度循环周期数有关。循环次数越多，所得总伸长率就越大，如图 6.4-3 所示。由于相变超塑性是在一个变动频繁的温度范围内，依靠结构的反复变化而引起的，材料的组织不断地从一种状态转变为另一种状态，故又称为动汰超塑性。又因为相变超塑性是在温度循环这样一个外在环境条件下产生的，所以亦称为环境超塑性。

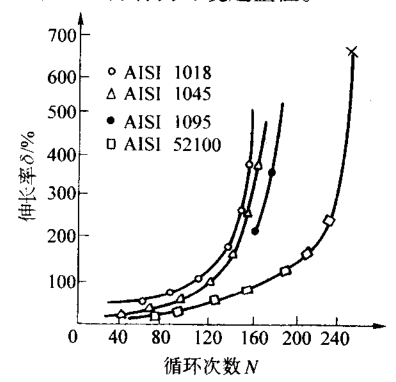


图 6.4-3 温度循环（538℃和 816℃）的伸长率和循环数的关系（$\sigma_s = 17.5$ MPa，AISI 为美国钢材牌号）

动态超塑性并不限于相变超塑性一类情况，这是因为对一些具有热膨胀各向异性的金属进行温度循环时，未利用相变过程，即使不在相变点的温度附近，也会产生超塑性。如无相变的 Zn 在 150～300℃的范围内，进行 1 664 次的温度循环，总伸长率可达 158%。所以动态超塑性还包括在动态热循环下的溶解析出、回复－再结晶或退火过程中出现的类似现象。

相变超塑性和微细晶粒超塑性不同，在超塑性变形之前，它不要求材料进行晶粒的超细化、等轴化及稳定化的预先处理。所以认为动态超塑性更具有发展前途。

近年来，由于相变超塑性试验机的发明，促进了相变超塑性的研究和发展。对于碳钢、合金钢及铸铁等都开展了相变超塑性研究，并取得很大成绩。如铁素体基球墨铸铁（W_{Mg} = 0.040%）在一定的温度和负荷条件下，经多次循环，总伸长率达到 250%以上，这对具有高脆性的铸铁是很可贵的。

影响相变超塑性的有关因素有：材质 M、作用应力 σ、最高加热温度 t_{max}、温度幅度（Δt）、加热和冷却速度（$\Delta t/\tau$）、循环次数 N 等，可用下式表示：

$$r = f(M, \sigma, t_{max}, \Delta t/\tau, N, \Delta t, \cdots) \quad (6.4\text{-}3)$$

除了上述主要类型的超塑性外，还有短暂超塑性、相变诱发塑性、应变速率循环诱发超塑性、大晶粒超塑性、单相固溶体超塑性、有序列无序超塑性、单晶超塑性等十多种其他类型的超塑性，这些推动了金属超塑性的发展。

1.2 超塑性变形的力学特征

超塑性变形的力学特征主要取决于它的变形特征。当金属材料拉伸时，呈现无缩颈的超塑性变形，应变硬化可忽略不计。其变形应力主要依赖应变速率的变化。典型的超塑性材料拉伸曲线如图 6.4-4 所示，图 a 为工程载荷－应变曲线，当应力达到最大值后，它随着应变量的增加而降低。图 b 为真实应力－真实应变曲线，实线是在恒定夹头速度下的拉伸曲线，虚线是在恒定应变速率下的拉伸曲线。当在恒定速率下拉伸时真实应力保持恒值，若在变形过程中产生晶粒长大或相粗化，也会出现硬化现象，使真实应力略有增大。但在长时间拉伸，也可能产生软化现象。白柯芬提出了描述超塑性流动特性的本构方程，在稳定状态下变形时，其流动应力与应变速率的关系为

$$\sigma = K\dot{\varepsilon}^m \quad (6.4\text{-}4)$$

式中，σ 为流动应力；$\dot{\varepsilon}$ 为应变速率；K 为与材料成分、结构及试验温度等有关的常数；m 为流动应力的应变速率敏



感性指数。

m 值大时，$\dot{\varepsilon}$的变化将引起 σ 很大的变化，当发生缩颈时，由于该处的 $\dot{\varepsilon}$增加，σ 也增大，从而对缩颈的发展起到抑制作用。

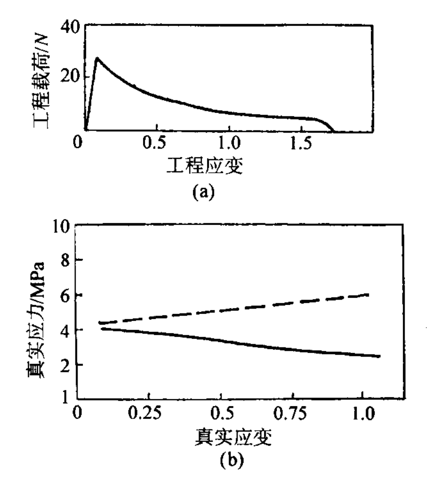


图 6.4-4　Pb－Sn 共晶合金变形时的工程载荷－工程应变曲线及真实应力－真实应变曲线

对一般金属及合金 $m \leqslant 0.3$；对超塑性材料 $m > 0.3$，一般在 0.3～0.8 之间，某些情况下接近于 1。

(1) 金属塑性变形的流动应力方程

金属材料塑性变形时，其流动应力 σ 与变形程度 ε、应变速率 $\dot{\varepsilon}$、变形温度 T、载荷 F、表面张力 γ 等因素有关。

设
$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, F, \gamma, \cdots) \tag{6.4-5}$$

对式 (6.4-6) 全微分，得到

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon} + \frac{\partial\sigma}{\partial\dot{\varepsilon}}\frac{d\dot{\varepsilon}}{d\varepsilon} + \frac{\partial\sigma}{\partial T}\frac{dT}{d\varepsilon} + \frac{\partial\sigma}{\partial F}\frac{dF}{d\varepsilon} + \frac{\partial\sigma}{\partial\gamma}\frac{d\gamma}{d\varepsilon} \tag{6.4-6}$$

当 $T > 0.4T_{熔}$ 时，式 (6.4-6) 的第一项很小，起作用的是第二项，它代表流动应力对应变速率的敏感性。在低的变形速度和高温条件下（等温过程），第三项和以后各项可取为零。因而，式 (6.4-5) 可写成

$$d\sigma = \sigma_\varepsilon d\varepsilon + \sigma_{\dot{\varepsilon}} d\dot{\varepsilon} \tag{6.4-7}$$

哈脱（Hart）认为 σ 的微小变化与 ε 及 $\dot{\varepsilon}$的变化成线性关系。而 σ_ε 及 $\sigma_{\dot{\varepsilon}}$不只是偏导数，同时也表示材料塑性流动现象的特点。

(2) 拉伸变形时的超塑性状态方程

当材料在稳定状态下拉伸变形时，可以获得高塑性，变形不限于局部，而是整个试样同时均匀无缩颈地变形。

为了确定材料均匀流动的条件，必须研究拉伸时试样横断面的变化，因为

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{6.4-8}$$

式中，F 为变形力；A 为试样横断面积。

变形力随时间的变化可写成

$$\frac{dF}{d\tau} = \sigma\frac{dA}{d\tau} + A\frac{d\sigma}{d\tau}$$

即
$$\dot{F} = \sigma\dot{A} + A\dot{\sigma} \tag{6.4-9}$$

设试样在塑性变形时体积不变，则应变速率为

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{l}\frac{dl}{d\tau} = -\frac{1}{A}\frac{dA}{d\tau} = -\frac{\dot{A}}{A} \tag{6.4-10}$$

将式 (6.4-8) 除以 $d\tau$，得

$$\dot{\sigma} = \sigma_\varepsilon\dot{\varepsilon} + \sigma_{\dot{\varepsilon}}\ddot{\varepsilon} \tag{6.4-11}$$

同时

$$\ddot{\varepsilon} = \frac{d\dot{\varepsilon}}{d\tau} = \frac{\ddot{A}}{A} + \frac{\dot{A}^2}{A^2} \tag{6.4-12}$$

将式 (6.4-8) 除式 (6.4-9) 得

$$\frac{\dot{F}}{F} = \frac{\dot{A}}{A} + \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \tag{6.4-13}$$

将式 (6.4-10) 及式 (6.4-11) 代入式 (6.4-13) 得

$$\frac{\dot{F}}{F} = -\frac{\dot{l}}{l}(1-\gamma+m) + m\left(\frac{\ddot{l}}{\dot{l}}\right) \tag{6.4-14}$$

式中，$\gamma = \frac{\sigma_\varepsilon}{\sigma}$，$m = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\sigma}\right)\sigma_{\dot{\varepsilon}}$

式 (6.4-14) 可描述不同情况的拉伸试验并给出 γ 和 m 的物理意义。通常的超塑性拉伸，其应变速度是恒定不变的，此时 $\dot{l} = 0$，则式 (6.4-14) 为

$$\left(\frac{d\lg F}{d\lg l}\right)_{\dot{l}=常数} = \gamma - 1 - m \tag{6.4-15}$$

γ 和 m 的物理意义：

$$\gamma = \frac{\sigma_\varepsilon}{\sigma} = \frac{1}{\sigma}\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\frac{d\sigma}{\sigma}}{\varepsilon\frac{d\varepsilon}{\varepsilon}} = \frac{n}{\varepsilon} \tag{6.4-16}$$

式中，n 为硬化指数。

$$n = \frac{d\lg\sigma}{d\lg\varepsilon} \tag{6.4-17}$$

因此，γ 是表示塑性变形时材料的硬化指数对变形的敏感性，即表示变形程度变化时硬化指数的变化。同样

$$m = \frac{\dot{\varepsilon}}{\sigma}\frac{d\sigma}{d\dot{\varepsilon}} = \frac{d\lg\sigma}{d\lg\dot{\varepsilon}} \tag{6.4-18}$$

参数 m 是表示塑性变形时材料流动应力对变形速度的敏感性，即表示材料硬化与应变速率的关系；它称为应变速率敏感性指数。

利用参数 m 及 n 的关系式代入式 (6.4-7) 则可写出方程式：

$$\sigma = \mathrm{Const} \times \varepsilon^n\dot{\varepsilon}^m \tag{6.4-19}$$

此式为粘性－塑性物态方程，表示材料变形时流动应力对应变程度和变形速率都敏感。

材料发生变形强化时，有两种情况：

1) 当材料变形时没有硬化，即 $n = 0$，则为：

$$\sigma = \mathrm{Const} \times \dot{\varepsilon}^m \quad 或 \quad \sigma = K\dot{\varepsilon}^m \tag{6.4-20}$$

这便是和黏性材料流动有关的方程，称为超塑性状态方程，它与流体力学中牛顿黏性流动方程相似。当 $m = 1$ 时，为典型的牛顿黏性流动行为，即 σ 与 $\dot{\varepsilon}$ 成正比。

(2) 当 $m = 0$ 时，则为：

$$\sigma = \mathrm{Const} \times \varepsilon^n \tag{6.4-21}$$

则材料为理想塑性体，表示塑性材料拉伸时流动应力与变形程度之间的关系，此时，与应变速度的关系比由于变形程度增大所引起的强化要小得多，可以忽略不计。

(3) 实现均匀变形的条件

拉伸试验时，开始出现缩颈之前是均匀变形。实际上，试样每一部位的截面可能不等，只要在变形过程中能使各截面的差异不扩大，则这样的变形为均匀或稳定变形。

均匀变形的试样上每一质点的载荷都相等，即 F 为常数，因此 $dF = 0$，将式 (6.4-8) 微分，得：

$$0 = \sigma dA + A d\sigma$$

或
$$0 = \sigma\dot{A} + A\dot{\sigma} \tag{6.4-22}$$

将式 (6.4-22) 除以式 (6.4-8) 得：

$$0 = \frac{\dot{A}}{A} + \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \tag{6.4-23}$$

以式 (6.4-12) 代入式 (6.4-24) 得：

$$0 = \frac{\dot{A}}{A} + \gamma\dot{\varepsilon} + m\frac{\ddot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}} \tag{6.4-24}$$

按前述方法计算，得：

$$\left(\frac{d\lg\dot{A}}{d\lg A}\right)_{F=常数} = -(1-\gamma-m)/m \tag{6.4-25}$$



若 $(\frac{d\dot{A}}{dA})_{F=常数} \leqslant 0$ (6.4-26)

则为均匀变形。

因为拉伸时 $\dot{A}/A$ 是负值，当

$$(\frac{d\lg\dot{A}}{d\lg A})_{F=常数} \geqslant 0 \quad (6.4\text{-}27)$$

则变形是均匀变形，用超塑性现象参数来表达时，为：

$$\gamma + m \geqslant 1 \quad (6.4\text{-}28)$$

显然这一概念恰好适合于理想的塑性及黏性材料。对理想黏性材料 $\gamma=0$，$m=1$，这就是牛顿黏性材料所具有的极限均匀性。对普通塑性材料，m 比 n 要小得多，于是均匀变形的条件是

$$\gamma = \frac{n}{\varepsilon} \geqslant 1 \quad (6.4\text{-}29)$$

因为一般的硬化指数值 $n=0.2\sim0.5$，则这类材料产生缩颈时，延伸率 δ 不超过 50%。由式（6.4-29）可知，在黏性流动时，塑性可显著提高。

(4) 应变速率敏感性指数 m 值对横断面变化速率的影响

m 值的物理意义是阻碍缩颈的发展，维持变形过程的均匀性。在出现缩颈部位的应变速率增大时，流动应力也增大，从而制约缩颈的发展。由式（6.4-8）及式（6.4-20）可得到

$$\dot{\varepsilon} = (\frac{F}{AK})^{\frac{1}{m}}$$

将式（6.4-11）代入上式得

$$-\frac{dA}{d\tau} = (\frac{F}{K})^{\frac{1}{m}} (\frac{1}{A^{\frac{1-m}{m}}}) \quad (6.4\text{-}30)$$

上式表明试样各断面减小速率与 m 值有关。分析上式可知，$m=1$ 时，断面变化率与断面 A 的大小无关，即与它的不均匀性无关。m 值减小时，试样断面积 A 的减小会使断面变化速率急剧增加。而且 m 值越小，试样局部不均匀性的面积减小则赶快，缩颈的倾向越大，如果继续变形，超过一定极限就会被拉断。m 值大，在试样断面缩小处，应变速率提高，强化显著增加，即对局部收缩的抗力增加，阻止断面的继续减小，不出现缩颈，保持均匀变形，呈现高的伸长率。

(5) 影响超塑性和 m 值的因素

影响超塑性行为的因素很多，而且很复杂。对微细晶粒超塑性来说，有应变速率 $\dot{\varepsilon}$、超塑性变形温度 T_S、晶粒度 L、应变硬化指数 n、晶粒形状因素 ρ、内应力 τ_j、组织状态 V 等。它们也都直接影响应变速率敏感指数 m 值的大小。因此，m 值是这些因素的函数，即

$$m = f(\dot{\varepsilon}, T_S, L, n, \rho, \tau_j, V, \cdots) \quad (6.4\text{-}31)$$

其中应变速率 $\dot{\varepsilon}$、变形温度 T_S 及晶粒度 L 是主要因素，所以通常用 $m=f(\dot{\varepsilon}, T_S, L)$ 来表达。

1) 应变速率。超塑性材料的变形过程近似黏性材料的变形过程，它的变形流动模型属于黏性缓冲模型，所以变形速率对它影响很大。金属材料只能在一定的速率区间内才显示出超塑性。通常在 $\dot{\varepsilon}=10^{-4}\sim10^{-1}\text{min}^{-1}$，或 $\dot{\varepsilon}=10^{-5}\sim10^{-2}\text{s}^{-1}$ 区间能显现出最佳的超塑性。这与晶粒度有关，晶粒越细，最佳超塑性越趋向高速率的区间。

根据 $m=d\lg\sigma/d\lg\dot{\varepsilon}$ 式可作 $\lg\sigma\sim\lg\dot{\varepsilon}$ 和 $m\sim\lg\dot{\varepsilon}$ 的关系曲线，如图 6.4-5 所示。图 6.4-5a 中 $\lg\sigma\sim\lg\dot{\varepsilon}$ 曲线具有 S 形特征，任何特定的应变速率曲线斜率均为 m 值，另外，m 值随应变速率的变化而变化，呈覆钟形（见图 6.4-5b），在中等应变速率区 m 值最高，但在两侧高或低的应变速率区，m 值逐渐减小到很低值。为了方便，可将 $\lg\sigma\sim\lg\dot{\varepsilon}$ 曲线分为三个区间。在Ⅰ区，应变速率极慢（$\dot{\varepsilon}<10^{-4}\text{min}^{-1}$），应力很低，并随 $\dot{\varepsilon}$ 的增大而缓慢上升，$m\leqslant0.3$，其形态近似蠕变曲线。此阶段是伴随着扩散的晶界滑移。在Ⅱ区，当 $\dot{\varepsilon}$ 逐渐增大时，斜率急剧增大，$\lg\sigma$ 逐渐接近最大值，而 m 出现最高峰，为明显的超塑性区间。在Ⅲ区，当 $\dot{\varepsilon}$ 继续增大时，$\lg\sigma$ 几乎达到最大值，斜率减低，m 值下降，其形态近似一般拉伸曲线，此时以位错蠕变占优势。当然这三个区间分界线的位置不是不变的，它随晶粒尺寸大小和变形温度高低而变化。

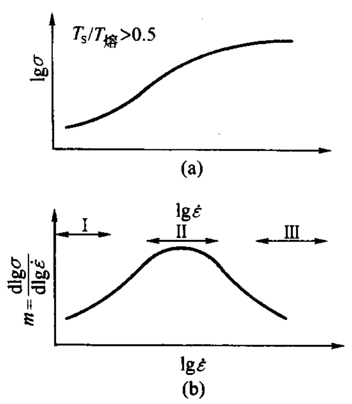


图 6.4-5 Mg-Al 共晶合金的 $\lg\sigma-\lg\dot{\varepsilon}$ 曲线及 $m-\lg\dot{\varepsilon}$ 曲线（变形温度为 350℃，晶粒尺寸为 10.5 μm）

要获得超塑性，在其他条件相同时，必须寻找适当的应变速率，使 m 值最大。

2) 变形温度。超塑性变形必须在一定的温度区间内进行，通常为 $T_S>0.5T_熔$。白柯芬用 Zn-Al 共析合金研究的结果如图 6.4-6 所示。在应变速度一定的情况下，在低温区，随着温度增加，m 值及延伸率都平缓增大。在接近临界温度 t_c 时（约 250℃），急剧上升达最高值，出现超塑性现象。而超过 t_c 时，则 m 值及延伸率均急剧下降。原因在于温度的升高，提高了原子的自由能，促使晶界滑移和晶界扩散的能力提高，当达到超塑性温度时就产生流动应力 σ 值下降、延伸率大大提高的效应。当温度升到某一值时，这种效应最大。另一方面，温度的升高也促使晶粒长大，当超过 t_c 温度时，晶粒长大剧烈，致使超塑性指标急剧下降。由此可见，超塑性是在一定的温度区间产生的。在超塑性出现的区间，提高变形温度将发生下列变化。

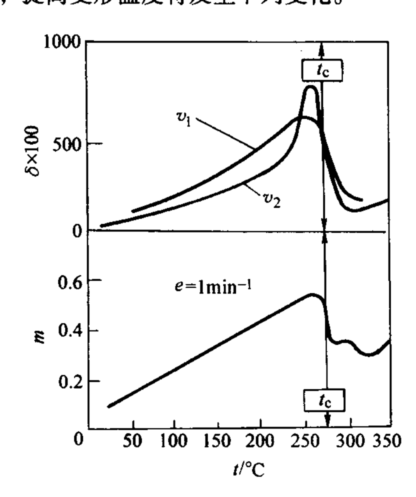


图 6.4-6 Zn-Al 共析合金的延伸率和 m 值与温度的关系
（$v_1=50.8$ mm/min，$v_2=25.4$ mm/min）

① 整个区间内流动应力均下降，在高应变速率下不明显（图 6.4-7），但是超塑性状态下温度对流动应力的影响要

比正常粗晶状态大得多。

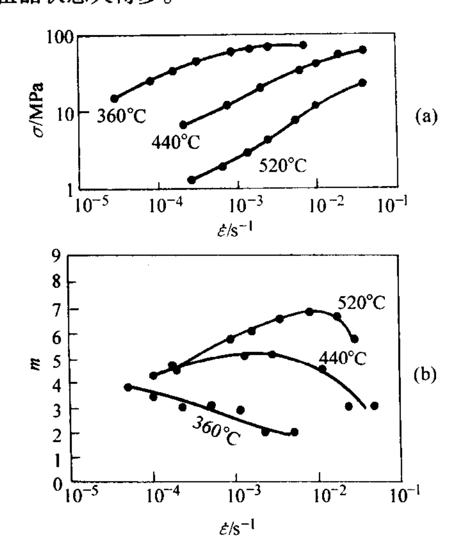


图 6.4-7 Al – Cu 共晶合金的 $\sigma-\dot{\varepsilon}$ 曲线及 $m-\dot{\varepsilon}$ 曲线

② 最大的 m 值增加，并向高应变速率方向推移。

③ Ⅰ与Ⅱ区和Ⅲ区的分界线向高应变速率方向推移。

④ 在高应变速率和低应变速率两端，m 值对温度的敏感性比超塑性Ⅱ区小。

3）晶粒度及组织状态。对微细晶粒超塑性的材料要求是晶粒极细、等轴，具有双相并且稳定。一般认为原始晶粒尺寸应小于 10 μm，才具有良好的超塑性。晶粒尺寸对 $\sigma-e$ 曲线及 $m-\dot{\varepsilon}$ 曲线的影响如图 6.4-8 所示。减小晶粒尺寸，会产生下列变化：

① 流动应力随晶粒细化向右下方推移而减低，晶粒度对 m 值的影响随 $\dot{\varepsilon}$ 值的增大而减弱，在Ⅲ区的 $\dot{\varepsilon}$ 值范围，影响接近于消失（图 6.4-8a）。

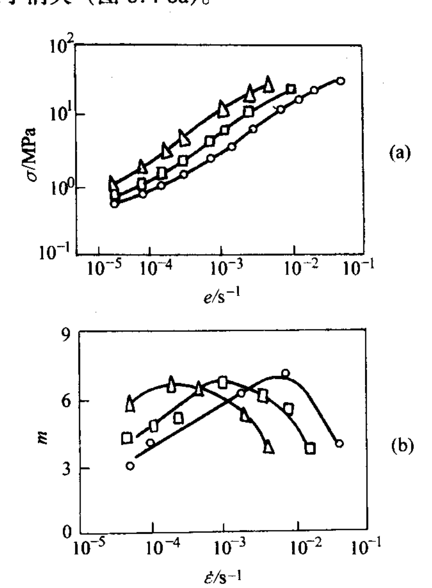


图 6.4-8 Al – Cu 共晶合金在 520℃时晶粒尺寸与 $\sigma-e$ 及 $m-\dot{\varepsilon}$ 的关系

（○ – 2.3 μm；□ – 3.8 μm；△ – 7.7 μm）

② Ⅱ区到Ⅲ区的分界线，移向高应变速率方向。

③ 最大 m 值的峰值增加，并移向高应变速率区（图 6.4-8b）。

④ 减小晶粒度对超塑性的影响与提高变形温度有相似的倾向性。

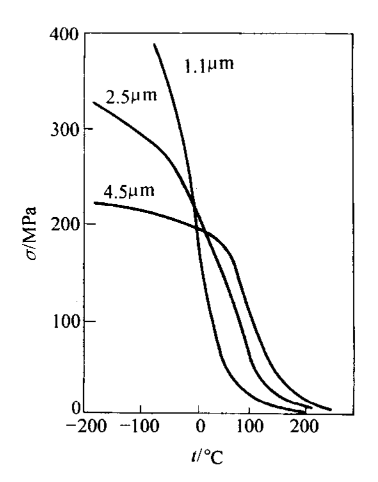


图 6.4-9 不同晶粒尺寸的 Zn – Al 共析合金温度与初始稳定流动应力的关系

金属的晶粒越细小，其强度反而下降，这与一般金属的常规情况相反。图 6.4-9 为三种不同晶粒度的 Zn – Al 共析合金的流动应力与温度的关系。曲线通过一个突变区并基本在该处相交。这是由常规转入超塑性状态的标志，但这一标准不十分可靠，因为在蠕变中也有类似的转变，而蠕变时不会有超塑性那样大的伸长率。

晶粒尺寸 L 对流动应力和应变速率的影响，可用下列式子表达

$$\sigma \propto L^b \qquad \dot{\varepsilon} \propto 1/L^a \tag{6.4-32}$$

式中 a 和 b 值与材料结构缺陷及温热加工过程有关，不同材料的 a 和 b 值不同，但对于同一材料也具有不同的 a 和 b 值。a 的数值从 1 至 5，b 的数值从 0.5 至 2。

此外，晶粒的形状、相的形态和分布等对超塑性都有影响。同时也发现粗晶材料在适当条件下能够具有高的 m 值，并呈现超塑性，如钛合金、β 黄铜及纯铝等。

1.3 超塑性变形的机理

金属超塑性并非一般的塑性变形机理所能解释。随着超塑性合金的发现，对超塑性变形机理的研究获得了很大的发展，并且从定性机理发展到经验表达式和定量表达式，提出许多假设和理论。基本上有“溶解 – 沉淀理论”、“亚稳态理论”、“晶界滑移”、“晶粒转动”、“扩散蠕变”、“位错运动”、“动态再结晶”和“晶界的非晶质流动”等理论。

1）溶解 – 沉淀理论。这一理论是由前苏联包赤瓦尔提出的，认为超塑性在两相中存在，其中一相在另一相中的溶解度随温度而变，变形时产生局部温度升高现象，使一些相界发生相互溶解，而在另一些相界上发生沉淀析出。这种扩散迁移过程使晶粒相互移动，在合适的高温下，变形速度小则产生超塑性。这一理论对于大量晶间滑移、晶粒转动及单相合金的超塑性现象还无法解释。

2）亚稳态理论。普列斯尼亚可夫（Пресняков）等研究发现，有些合金的极限溶解度不受温度的影响，并认为在等温变形过程中不可能有很高的局部温度波动，通过对 Zn – Al 等合金超塑性的研究，提出超塑性与合金的特殊组织状态——亚稳态组织有关。认为金属超塑性变形是组织从亚稳态转变到稳态的过程；把亚稳态相看作一种物质的新态，具有无定型的准液态黏性流动特性，变形时产生“准液态的扩散塑性”。这一理论可以解释共晶和共析合金的超塑性、冷加工后再结晶或有序到无序转变引起的超塑性。但不能解释晶间滑移、单相合金及一些无需淬火的材料超塑性。鲍尔（Bull）等人提出只要在变形过程中保持细小晶粒，在适当条件下，都可能呈现超塑性，因此材料的亚稳态并不是产生超



塑性的前提。例如 Si－Bi 和 Sn－Pb 共晶合金，不需要产生亚稳态同样具有超塑性；钛合金也无需淬火，只需大变形加工得到稳定的细晶组织就具有超塑性。

3）扩散蠕变理论。不少学者以扩散蠕变来解释超塑性。根据扩散路径有晶格扩散（称 N－H 型扩散蠕变）和晶界扩散（C 型扩散蠕变）。

N－H 型扩散蠕变认为在拉应力作用下，金属空位的化学势能产生局部的变化，垂直于拉伸轴的晶界处于高位能状态，平行于拉伸轴的晶界处于低位能状态，此时必然引起空位的移动以平衡这种差异，空位的移动引起原子相反方向的移动，晶粒发生沿应力方向伸长和垂直方向收缩的变形，如图 6.4-10 所示。在应力 σ 作用下，原子通过晶格按箭头方向扩散，晶粒发生变形。图中虚线为原晶粒，阴影区表示扩散物质的量。变形速率与应力的关系可由下式表示

$$\dot{\varepsilon} = \alpha V D_L \sigma / k t d^2 \qquad (6.4\text{-}33)$$

式中，α 为晶粒形状常数（$\alpha = 5 \sim 15$）；V 为原子体积；D_L 为晶格内扩散系数；k 为玻耳兹曼常数；T 为温度；d 为晶粒尺寸。

这种机理的特征是：

① 流动应力和应变速率呈线性变化，即 m 等于 1；

② 应变速率与晶粒尺寸的平方成反比；

③ 变形过程的激活能是自扩散的；

④ 变形中晶粒拉长。

如果应力导致空位流动不是发生在晶内，而是沿着晶界，即 C 型蠕变，则方程为

$$\dot{\varepsilon} = \frac{B_2 V D_{gb} B}{\pi K T} \frac{\sigma}{d_2} \qquad (6.4\text{-}34)$$

式中，B_2 为常数（$B_2 \approx 50$）；D_{gb} 为晶界扩散系数；B 为晶界宽度。其余符号同式（6.4-33）。

同时考虑晶格扩散和晶界扩散的方程式为

$$\dot{\varepsilon} = \frac{20\sigma V D_L}{K T d^2}\left(1 + \frac{\pi B D_{gb}}{d D_L}\right) \qquad (6.4\text{-}35)$$

此理论可以解释一些材料的蠕变变形，但不能充分解释超塑性变形，如在蠕变变形中，m 值可为 1，并且晶粒沿外力方向拉长；而在超塑性变形中，m 值一般不大于 0.8，变形后晶粒仍保持等轴状。

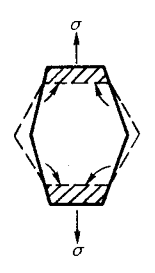


图 6.4-10 N－H 扩散蠕变的示意图

4）由位错运动调节的晶界滑移理论。鲍尔（Bull）和汉庆生（Hutchinson）提出晶粒作为滑移单位，直到某一个位向不利于滑移，因而阻碍运动并产生应力集中。为了松弛这种应力集中，在障碍晶粒内部发生位错，如图 6.4-11 所示。位错向对面晶界运动并引起塞积，由于晶界滑移的进展，塞积的位错将沿晶界攀移而消失。根据这种理论而推导出的应变速率方程式与实验相符。但对 Zn－Al 共析合金试样在 250℃变形冷却后，观察不到塞积。对 Zn－40%Al 合金及 Mg－Al 合金进行加载淬火，也未观察到位错塞积。这说明在超塑性变形中控制位错运动的不是塞积的攀移。

穆赫吉特（Mukherject）提出了改进的模型形式，即晶粒是单独转动而不是成群地转动。位错产生在晶界凸缘和隆

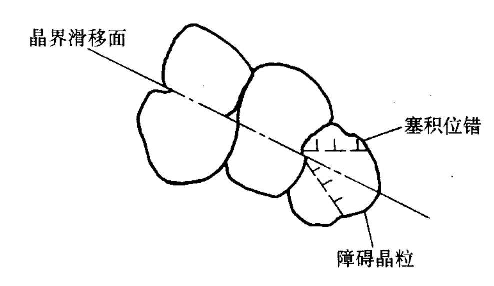


图 6.4-11 Bull－Hutchinson 晶界滑移模型图解

起处，它穿过晶粒并以塞积的形式抑止在晶界前，再以攀移的方式进入晶界而减少，并认为 S 形曲线（图 6.4-7）的Ⅰ区由 C 型蠕变、Ⅱ区由他提出的这种形式、Ⅲ区由位错攀移所组成。Zn－Al 共析合金及 Sn－Pb 共晶合金的实验结果与理论上的结果是一致的。但是，当凸缘在晶界滑移中移动时，因为所有位错并不是在一个面上起动，很难了解任何类型的塞积如何形成。

吉弗金斯（Gifkins）提出的晶界位错机理如图 6.4-12 所示。由于晶界三角点处塞积的晶界位错运动引起晶界滑移，应力集中被领先位错分别分解成在Ⅰ、Ⅱ两个晶界上可移动的晶界位错和可滑移的晶内位错而松弛。这些位错通过攀移或滑移进入晶界或靠近晶界Ⅰ和Ⅱ，直至它们遇到其他位错，可以消失或再结合形成新的晶界位错。这个相互作用的结果引起晶粒转动。按照这种模型所导出的应变速率方程式与 Mukcherject 方程式基本一致。但是，目前还没有找到直接的证据。

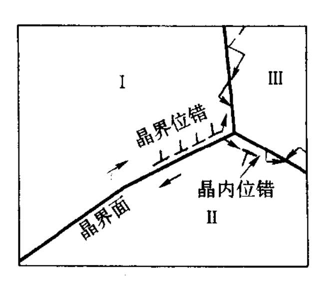


图 6.4-12 晶界滑移的 Gifkins 模型

5）结合扩散蠕变的晶界滑移理论。阿舒倍（Askby）和费莱尔（Verrall）提出了晶界滑移时伴随扩散蠕变的模型（称 A－V 机理）。即晶界滑移的调节不是依靠晶内位错滑移运动和晶界迁移，而是通过原子的扩散迁移进行调节。

许多试验研究表明，在超塑性变形时产生很大的延伸率同时组织仍保持等轴晶粒，在晶界上极少产生孔隙和裂纹。A－V 机理所描述的晶粒转换机构的图解表明了四个晶粒为一组的模型，在拉伸应力作用下从原始状态经中间状态到最终状态形状仍相同，只是位置发生了变化，而导致整体沿纵向的延伸变形。如图 6.4-13 所示，在这个过程中，晶粒的转动是由于滑移和经受协调应变而进行的。图 d 和图 e 表示原子扩散的晶界滑动机构，包括晶界扩散和晶内扩散运动，而前者的扩散速度比后者大得多，正是由于这种扩散迁移而使晶界发生滑移。A－V 机理可以解释 Zn－Al 共析合金晶粒转换，这在电镜观察下已得到证实。图 6.4-14 为 A－V 机理模型示意图。虽然这一机理未臻完善，但认为是目前较为成熟的一种理论。

总之，超塑性机理的研究还不成熟，而且普遍认为在超塑性变形过程中不是单一机理起作用，而是几种机理综合作用的结果。其中以扩散蠕变和位错调剂的晶界滑移为主要机理。一般说，低应变速率在扩散蠕变起主要作用；高应变速率在位错滑移起主要作用；中间区即超塑性区，晶界滑移起主要作用。



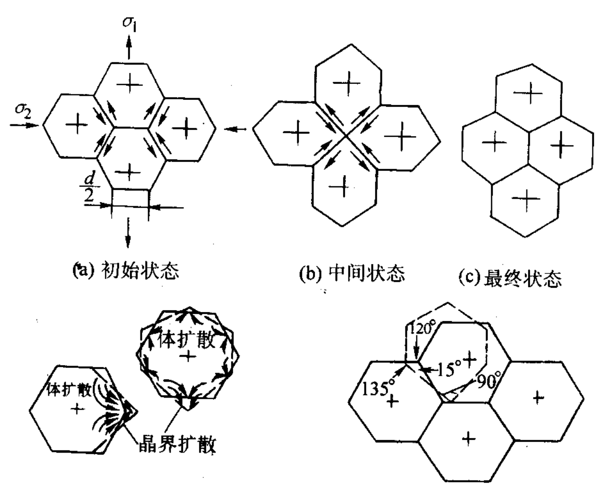


图 6.4-13 晶粒转换机构的图解

1.4 超塑性变形时的组织结构及性能

了解超塑性材料变形后的组织结构及性能，对指导生产具有实际意义。

(1) 组织结构变化

1) 晶粒度变化。处在高温（$T_S > 0.5T_{熔}$）下的超塑性变形，其结构变化的特点之一是晶粒长大，并且随着变形速度的降低而加快，甚至晶粒沿拉伸方向有些拉长。但在最佳变形速度范围内，塑性最大时，晶粒长大不显著。

由超塑性变形引起的晶粒长大并不排除晶内滑移的可能性。在高温变形时，由于晶格缺陷、空穴和位错浓度的增加，晶粒内的滑移促进合金中的扩散过程，因此造成晶粒长大。

在某些情况中也有晶粒细化现象。残留的铸造组织以及热加工后遗留的各向异性状态都会在超塑性变形初期受到破坏，从而导致晶粒细化。

在压缩试验中，变形后的金相显微组织比压缩变形前

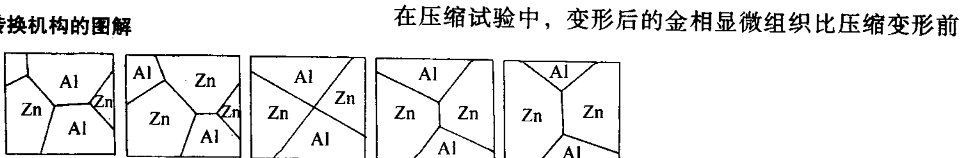


图 6.4-14 Zn－Al 共析合金超塑性变形时晶粒转换的电镜示意图
（100℃，$m = 0.3$）

小，随着压缩变形程度增大，晶粒更趋于细化。

2) 无织构。许多研究表明，超塑性变形时晶粒的等轴性保持不变（HPb59—1 黄铜的伸长率达 500%时晶粒仍保持等轴）。奥尔金（Alden）在对 Sn－Bi（Bi 质量分数 5%）合金进行超塑性拉伸时，发现其伸长率达 1 000%时晶粒仍保持等轴。而且进行压缩变形也发现随着压缩变形程度增大，晶粒更加趋于细化和等轴化，而带状纤维组织结构破碎也越强烈。塞基特（Sagat）在进行黄铜超塑性试验时也证明了材料的带状组织结构在变形程度为 46%时消除。

3) 空洞。现有大量的金相资料表明，超塑性拉伸变形时伴生空洞。这些材料有：$\alpha-\beta$ 黄铜、铝青铜、Al－Zn－Mg－Zr、Al－Cu－Zr、Mg－Zn－Zr 及 Zn－Al 共析合金、微观双重不锈钢、$\alpha-\gamma$ 不锈钢、Fe－Ni－Mo 及 Ni 基合金等。在大变形时，用普通的金相方法很容易看到空洞，其直径约与晶粒尺寸相等，并均匀地分布在整个标距范围内。用同样的材料，同样的变形程度和相同应变速度做压缩试验时，不产生空洞。

塞基特对质量分数为 3%的 $\alpha-\beta$ 黄铜，在超塑性变形时生成的空洞作了大量的研究，指出这种合金包含有粗的铁颗粒（直径约 1～2 μm），而且 α/β 相边界是空洞优先成核的位置。在 600℃变形时，经大变形后，用光学的方法可以看到空洞。空洞的数量在 m 值最大时达到最大，但仍然获得大的延伸率。空洞的生成不是由于应力作用下由空位群聚集而成，而是通过晶界滑移产生。

空洞不仅与应变和应变速率有关，还与变形温度、晶粒尺寸和相的性质有关。在 HPb59－1 黄铜超塑性变形中，发现在相同变形条件下，细晶组织比粗晶组织更易产生空洞。在研究 Zn－Al 共析合金空洞形成时，观察到空洞沿拉伸方向拉长，而且随着晶粒长大，数量增多。有些材料的空洞数量会由于变形温度增加而减少（如含质量分数 3%的 $\alpha-\beta$ 黄铜），也有些材料因增加温度而增大了晶界滑移，空洞数量也增加。

可生成空洞的材料，在超塑性变形时会通过空洞的相互连接而最终产生断裂，断口看不到明显的缩颈，断裂方式为脆性断裂。对空洞不敏感的材料断裂时，试样出现缩颈，断口呈杯锥形。

4) 位错结构。研究超塑性变形微观中的位错结构，认为拉伸时位错结构的形成与拉伸速度有关。如 Zn－ Al（Al 质量分数 0.4%）合金在原始状态下不存在位错，在 20℃低速变形（$5\times10^{-5}s^{-1}$时，某些晶粒内可看到个别的位错，变形速度增加到 $5\times10^{-4}s^{-1}$时在很多晶粒内都有位错，变形速度增加到 $10^{-2}s^{-1}$时不仅增加了位错密度，还形成亚结构。超塑性材料拉伸后的结构中存在位错，说明变形过程中结晶学的滑移在起作用。从细晶材料（镍、镍铬、Zn－Al（$w_{Al}=0.4\%$）合金等）在提高变形速度时位错结构变化的特点可以说明有更多的滑移系参与了作用。在最佳变形速度时不形成亚结构，亚结构仅在高速变形时形成。

(2) 超塑性变形对力学性能的影响

1) 超塑性合金变形后仍保持细而均匀的等轴晶粒组织，不存在织构，不产生各向异性，所以具有较高的抗应力腐蚀性能。我国对钛合金（Ti－6Al－4V）整体涡轮锻件经超塑性等温模锻后，测定各部位的显微组织均为细小的等轴组织，不同部位和不同取向试样的室温拉伸性能也相当接近。对耐热材料，超塑性成形后，还可以用热处理方法使晶粒粗化，以提高其耐热性能。

2) 超塑性成形的零件中不存在由于冷加工而产生的储能或弹性残余应力，热处理后，尺寸稳定不变形。这对钛金很有意义，可避免由于残余应力引起的弹性后效问题。

3) Zn－Al 共析合金成形后冷却到室温状态，得到微细的等轴二相混合组织，与原材料相比，其硬度和抗蠕变性能均降低。由于蠕变使成形后的零件经过一段时间后会产生畸变，其形状及尺寸发生变化而不能使用。可以采用添加元素（如 Cu、Mg、Ti 等）和其他处理方法来提高使用状态的力学性能和抗腐蚀能力。

4) 有加工软化现象存在。对 Zn－Al 共析合金超塑性材料压缩时，其维氏硬度和压缩率的关系为，随着压缩率的增加，维氏硬度降低。说明压缩试验时，也有所谓加工软化现象存在。



5）高 Cr 高 Ni 超塑性不锈钢材料超塑性成形后，形成微细的两相混合组织时，显示出高的疲劳强度，疲劳强度与抗拉强度之比达 60%～62.5%。

2　超塑性模锻

2.1　超塑性体积成形的特点

传统的普通热模锻工艺不能保证锻件的尺寸精度和粗糙度。尤其是高温合金和钛合金，由于变形抗力大、可塑性极低、锻造温度范围窄，采用常规的锻造方法不可能锻造出形状复杂、精度高、薄壁高肋的模锻件，往往也不可能满足零件的力学性能要求。

超塑性模锻具有下列特点。

1）在超塑性状态下，金属变形抗力小，如 Zn－Al 共折合金在 250℃时，变形抗力小于 2 MPa；HPb59－1 黄铜在 620℃时，为 2～3 MPa；IN100（美国 Ineonel 公司商业牌号）在 1038℃时，为 2.8 MPa。由此可见，金属材料超塑性成形时的变形抗力一般只有常规塑性成形时的 1/3～1/5。例如钛合金超塑性模锻、挤压时的变形抗力只有 100～150 MPa，而常规模锻时的变形抗力约为 500 MPa。因此可以节省设备投资和动力消耗。超塑性成形适合于中小批量生产。

2）金属材料在超塑性状态下，镦粗的变形程度可达 95%以上。因此，使高强度和低塑性材料有可能一次获得大变量，可以实现一次加压成形，省去预锻或多次成形的中间退火等工序。

3）在超塑性状态下，金属的流动性极好，可以一次成形复杂的锻件。特别适应于形状复杂、不对称零件的成形和薄壁高肋锻件的一次成形。如飞机上的框架、大型壁板、钛合金的叶轮和高温合金的整体涡轮等。

4）超塑性模锻成形后的零件具有较均匀的宏观组织和细小显微结构，零件的强度和塑性指标都比较好。超塑性锻件为等轴晶粒组织，各向同性，所以具有较高的抗应力腐蚀性能。

5）超塑性模锻由于变形温度稳定，变形速度缓慢，锻件基本上没有残余应力，因而尺寸精度高，不产生翘曲，为实现少或无切削加工开辟了一个新的领域。

2.2　常用超塑性材料

（1）超塑性 Zn－Al 合金

超塑性 Zn－Al 合金是一种典型的超塑性材料，Zn－Al 共析合金是研究最多和应用最广的材料之一，合金在一定条件下呈现出极大的塑性（$\delta>1\ 000\%$）和极低的流动应力（$\sigma_s<2$ MPa）在成形过程中流动性和填充性极好，为精确成形提供了极优越的条件。Zn－Al 共析合金是一种较廉价的超塑性材料，国内已经在电讯、电器、仪表等行业得到了较为广泛的应用。表 6.4-1 列出了锌基超塑性合金的主要性能指标。

（2）超塑性铝基合金

表 6.4-1　锌基超塑性合金

化学成分	变形温度/℃	变形速度/min⁻¹	伸长率 δ/%	m 值
Zn－22Al	200～250	（1－10）$\times10^{-2}$	>2 500	0.6
Zn－22Al－0.9Cu	约 250	（1.25－16.7）$\times10^{-2}$	>1060	0.6
Zn－22Al－1Cu－0.03Mg－0.1Ti	约 250	3×10^{-1}	1 150	
Zn－22Al－2Cu－0.05Mg	250		1 200	
Zn－20.39Al－0.33Cu－0.022Mg	250		840	
Zn（工业纯度）	20～70		400	0.2
Zn－0.2Al	23		460	0.81
Zn－0.4Al	20		550	0.43
Zn－4.9Al（共晶）	200～360		300	0.5
Zn－40Al	250		700	0.48
Zn－5Al－0.03Mg	340	1.6×10^{-1}	>5 000	0.7
Zn－0.1Ni－0.04Mg	230～250	3×10^{-2}	>980	0.5
Zn－4Al－1Cu	280～350	（1－10）$\times10^{-2}$	2 000	0.65
Zn－20Al	250		1 630	
Zn－50Al	250～300		1 000	0.3

早期研究的超塑性铝基合金都是共晶成分或共晶附近的成分。如 Al－33Cu 共晶合金，经过适当的热加工（在 520℃挤压，变形率为 70%）和热处理（在 520℃退火），在 520℃进行拉伸试验，其伸长率可达 1 000%。但是，这种材料在室温下的力学性能不好，不能用于生产。

Al－6Cu－0.5Zr 是一种典型的超塑性铝基合金，这种合金在 350～500℃之间出现超塑性，在 430℃和应变速率为 $1.3\times10^{-3}\ s^{-1}$ 的条件下，最大伸长率可达 3 000%，m 值大于 0.3。Al－10Zn－1Mg 是另一种典型的超塑性铝基合金，在 520℃，拉伸应变速率为 $10^{-2}\ s^{-1}$ 时，最大伸长率可达 2 600%，平均伸长率为 1 850%。LY12 材料在 380～480℃热变形（$\varepsilon=92\%$）后空冷，再经稳定化处理（350℃，保温 2 h，空冷）后获得的晶粒平均尺寸小于 10 μm，在 440℃，应变速率为 $1.67\times10^{-4}s^{-1}$ 时拉伸，最大伸长率可达 330%，m 值大于 0.36。这些铝基超塑性合金都通过超塑性模锻成功地生产出了工业零件。

原先认为很难实现超塑性的铝合金，如 LY16、LD8、LD7 等通过变形和热处理的途径都能获得超塑性。常见的铝基超塑性合金的及其特性如表 6.4-2 所示。

（3）超塑性铜基合金

铜合金具有良好的导电、导热、耐磨、抗腐蚀性，并且有一定的硬度、强度、热强度和塑性。因此，在轻工、仪表和国防工业中获得了广泛的应用。

对铜合金超塑性的研究是 20 世纪 60 年代初期开始的。1959 年，前苏联普烈斯亚可夫等把 H62 黄铜在 870℃、HPb59－1 黄铜在 770℃拉伸变形，得到 180%的伸长率。1961 年对 Cu－48Zn 合金在 520℃拉伸变形时，得到 240%的伸长率。试验所用的材料，多数采用铜铸锭，在 β 单相区淬火后，用大变形量冷轧，随后退火处理，得到微细的两相组织。国内学者在 1978 年用国产工业用 H62 和 HPb－59－1 黄铜，经预处理后进行实验，HPb59－1 黄铜在 620℃拉伸变形时，延伸率达 500%（未断）；H62 黄铜在 750℃，伸长率达 624%（未



断)。QA19－2铝青铜在880℃，夹头速度为1.0 mm/min时，伸长率可达533%，QA19－4铝青铜在830℃，夹头速度为1.0 mm/min拉伸，伸长率可达910%，$m=0.49$。

常见的铜基超塑性合金及特性如表6.4-3所列。

表6.4-2　铝基超塑性合金

化学成分或合金牌号	变形温度/℃	伸长率 δ/%	m 值
Al－17Cu	400	600	
Al－28Cu	670～700	500	0.6
Al－33Cu	520	1 000	0.63
Al－33Cu－7Mg	420～480	＞600	0.72
Al－25Cu－11Mg	420～480	＞600	0.70
Al－14.1Cu－4.7Ni	450～550	520	0.35
Al－12Cu－4Si	500	100	0.40
Al－25.2Cu－5.2Si	500	1 310	0.43
Al－8.2Mg－47Si	450～550	＞580	0.4
Al－9.5Mg－3.4Si	500	200	0.23
Al－6.5Mg－7.2Si	500	400	0.34
Al－11Si－4.9Ni	450～550	210	0.37
Al－7.0Si	450～550	200	0.17
Al－11.7Si	450～550	480	0.28
Al－17Si	450～550	320	0.29
Al－7.6Ca	450～550	850	0.78
Al－10.7Zn－0.9Mg－0.5Zr	550	1 550	0.9
Al－8Zn－1.0Mg－0.5Zr	535	1 100	0.5
Al－5.6Zn－1.56Mg－0.41Zr	530	500	0.7
Al－6Mg-0.4Zr	400～520	890	0.6
Al－6Cu－0.5Zr	430	约3000	0.5
Al－10Zn－1Mg－0.4Zr	550	1 950	0.64
Al－8Zn－1Mg－0.4Zr	525	1 650	0.6
LC4	516	1 550	0.85
LC9	500	1300	
Al－Ca－Zn	550	830	0.4
Al－5.5Ca	550	715	0.4
Al－5Ca－4.8Zn	550	930	0.38
Al－6Cu－0.35Mg－0.4Zr	440	1 320	0.47
LY12	440	330	0.36
Al－13Si	520	248	0.5
Al－6.5Mg－0.6Mn（LF6 苏 AMΓ6）	420	440	0.45
Al－6Zn－3Mg	360	400	0.35
LD5（苏 AK6）	515	270	0.55
L3	350	164	0.3
LD7（苏 AK4－1）	530	230	0.45
LY16（苏 Д20）	450～475	180	0.45

表6.4-3　铜基超塑性合金

合金成分或合金牌号	变形温度/℃	伸长率 δ/%	m 值
Cu－40Zn－1Pb（HPb59－1）	620	615	0.45
Cu－38Zn（H62）	750	1 170	0.65
Cu－44Zn	650	220	
Cu－50Zn	520	240	
Cu－50Zn	600	165	
Cu－40Zn	690	250	0.65
	600	515	0.64
	600	460	0.78
	600	410	0.60
	600	171	0.52

续表 6.4-3

合金成分或合金牌号	变形温度/℃	伸长率 δ/%	m 值
Cu－41Zn（$w_{Fe}<0.04$）	600	410	0.65
Cu－42Zn（$w_{Fe}<0.04$）	600	277	0.43
H59（Cu－41Zn）	600	500～620	0.57
Cu－42Zn	400	480	0.70
Cu－40Zn－0.3Fe	600	340	0.70
Cu－38.5Zn－3Fe	675	340	0.53
Cu－40.3Zn－0.5Al－0.2Cr Cu－9.3Al Cu－9.8Al Cu－9.14Al Cu－9.5Al Cu－9.57Al	500～550 450 700 800 800 800	1 000 2 500 700 300 640 350	0.55 0.3～0.4 0.7
Cu－67Al	520	500	
	445～530	400	
Cu9.5－Al－4Fe（CDA619）	800	＞700	0.5
Cu－9.5Al－Fe（CDA619）	800	＞750	0.64
Cu-10Al－3Fe	800	720	0.6
Cu－9.0－1.0Al－1.6～2.6Mn	800～900	165	铸态
Cu－38Al－1.8Si－0.4Co（CDA638）	550 600 500～600	318 380 750	0.34 0.4
Cu－9Al－4.2Fe－4.6Ni－0.8Mn	850～880	600	0.4
Cu－8.27Al－2.24Mn（QA19－2）	880	533	
Cu－8.8TAl－3Fe（QA19－4）	830	910	0.49
Cu－37Zn－15Ni（IN836）	580 482	678 305	0.46
Cu－28Zn－15Ni－13Mn（IN629） Cu－38Zn－15Ni－0.2Mn	580 454～565	450 316	 0.41～0.44
Cu－7P	410～600	550～600	0.5
Cu－Ag 共晶	675	500	0.53
Cu－6Al－3Mn－2Fe	720	400	0.32

（4）超塑性钛合金和高温合金

随着航空和航天工业的发展，钛合金和高温合金的应用日益广泛。但是，由于这些合金的变形抗力高，塑性差，难于机械加工及成本高等特点，所以用一般方法很难成形或成形后的质量不理想。只有采用超塑性成形技术才能克服上述困难。国内外钛合金和高温合金的超塑性特性列于表 6.4-4 中。

表 6.4-4　钛合金和高温合金的超塑性特性

化学成分或合金牌号	变形温度/℃	伸长率 δ/%	m 值
Ti－15Mo（IMI205） Ti－4Al－3Mo－1V（BT14） Ti－5Al－2.5Sn（IMI317） Ti－6Al－4V（TC4） Ti－6.5Al－3.5Mo－2Zr（TC9） Ti－7.9Al－1Mo－1V	580～900 840 1 100 800～900 900 926	450 950 450 1 600 2 837 394	0.45 0.82 0.72 0.85 0.8 0.43
Ti－4Al－3Mo－1V（BT14）	850 875 875	1 000 ＞1 200 ＞2 000	0.8 0.7
BT16 BT20	800 900	190 400	0.35 0.32

续表 6.4-4

化学成分或合金牌号	变形温度/℃	伸长率 δ/%	m 值
Ti－2.5Al－7.5Mo－1Cr－1Fe（BT22）	860	250	0.5
Ti－5.5Al－2.5Mo－2Cr－1Fe（BT3-1）	850～940	＞2 000	0.4～0.8
Ti－6Al－5Zr－4Mo－1Cu－0.25Si（IMI700）	800	300	
Ti－11Sn－5Zr－2.25Al－1Mo－0.25Si（IMI679）	850	734	0.43
Ti－4.5Al－5Mo－1.5Cr	870	780～500	0.75
Ti－6Al－6V－2Sn	800～980	800	0.6
Ti－13Cr－11V－3Al－1.15			
Ti－5A1－4Mo－4Cr－2Sn－2Zr	800～840	2 000	0.6～0.8
Ti－4Al－7Mo－10V－2Fe	400～450	300～500	0.4～0.5
TC6	900	2 000	
TC3	900	688	
GH118	1 120	600	
IN－100	1 037	1 300	
	1 093	1 000	0.45～0.55
JN－713	1 036～1 093	230	
JN－744	925	600	0.5
IN－836	550	＞300	0.45
Ni－20Cr	1 000	190	0.41
Ni－39Cr－8Fe－2Ti－1Al	980	960	0.5
Ni－26.2Fe－34.9Cr－0.8Ti	795～855	＞1 000	0.5
Ni－39Cr－10Fe－1.75Ti－1A1	810～980	＞1 000	0.5
Ni－49Cr	1 000	400	
工业纯镍 Ni（Hn－2）	800	180	0.38
ЖС6－K（苏）	1 075～1 125	500	

2.3 典型件的超塑性模锻工艺

超塑性模锻可分为微细晶粒超塑性模锻和相变超塑性模锻两类。微细晶粒超塑性模锻用的毛坯必须经过超细晶处理。相变超塑性模锻过程中，毛坯必须在相变温度上下进行温度循环处理。即，在相变超塑性模锻过程中要对锻造温度进行动态控制，使锻造毛坯的再结晶和相变同时发生，以便在再结晶的原始相的晶界上形成新相，阻碍晶粒长大。而这种锻造温度的动态循环控制装置相当复杂，设备投入成本很高，因此，目前相变超塑性模锻的工业应用远远不如微细晶粒超塑性模锻那样广泛。以下主要介绍微细晶粒超塑性模锻。

（1）锌铝合金超塑性模锻

超塑性锌铝合金是一种典型的超塑性材料。它具有超细等轴晶粒组织，超塑性变形的温度不高，流动应力极低（约 2 MPa），伸长率极高（可达 1 000%以上），在成形加工中流动性很好，在室温下有一定的强度。现以 Zn－22Al－0.2Cu 合金及 Zn－22Al 合金的微调电容器（图 6.4-15）和安平手轮（图 6.4-16）为例介绍如下。

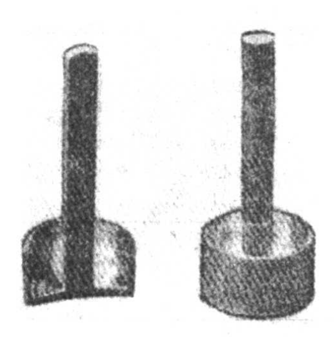


图 6.4-15　微调电容器锻件

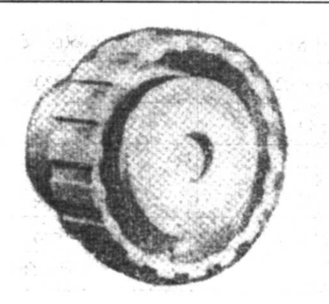
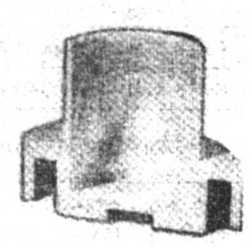



图 6.4-16　安平手轮锻件

1）成形用的设备。SY71－45 型塑料制品液压机，最大锻压吨位为 45 t，可通过调节回油阀来控制上压头的下降速度。通过上下两块电热板加热工件，在加热器上装有自动控制装置，最高控制温度为 300℃。

2）成形用的模具。由于 Zn－22Al 合金有较高的导热性，并要求将模具加热到合金的成形温度，因此模具应具有一定的坚固性、耐热稳定性和抗氧化性。采用的模具材料为 Cr12MoV、T10 和 45 钢。微调电容器锻件的模具见图 6.4-17，安平手轮锻件的模具见图 6.4-18。

3）坯料准备。微调电容器及安平手轮分别采用 Zn－22A1－0.2Cu 和 Zn－22A1 合金合金挤压棒材做坯料。

坯料尺寸：微调电容器为 $\phi 15.5_{-0.1}^{0} \times 2.8_{-0.1}^{0}$ 和 $\phi 14.0_{-0.1}^{0} \times 5.2_{0}^{+0.1}$ mm；安平手轮为 $\phi 30_{-0.1}^{0} \times 3.4_{-0.3}^{0}$。坯料先进行退火，退火温度为 310℃±15℃，保温 2～3 小时后炉冷，随后进行超塑性热处理，得到合金的微细晶粒组织。具体工艺为：在 350℃±10℃的盐炉中保温 1 h，在盐水中淬火，保持 1 h，然后于 250℃回火时效半小时后空冷。

4）模锻

① 模锻温度：经过试验确定，Zn－22Al 合金及 Zn－22Al－0.2Cu 合金的模锻温度为 250℃±10℃。



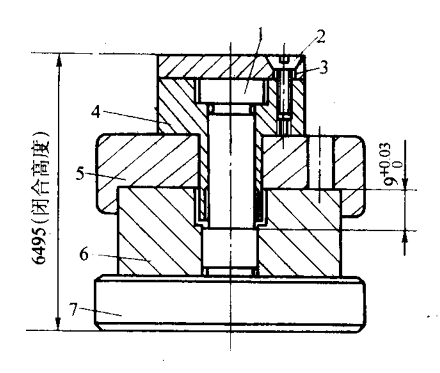


图 6.4-17 微调电容器模具

1、4—型芯；2—螺钉；3—盖板；5—脱件板；6—型腔板；7—底板

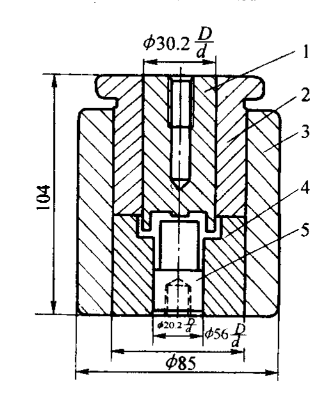


图 6.4-18 安平手轮模具

1—上冲头；2—导向套；3—外套；4—凹模；5—下冲头

② 模锻速度：采用 45 mm/min 左右的速度模锻安平手轮时，所需压力为 20 t 力，时间为 2 ~ 3 min；模锻微调电容器时，所需压力为 12 t 力，时间为 1 ~ 3 min。

微调电容器模锻件见图 6.4-15，安平手轮模锻件图 6.4-16。由图可见，成形的模锻件形状复杂，结构精致，表面质量高（由模具加工精度所决定）。

③ 润滑剂：为了减少成形时金属流动的摩擦力，防止金属粘附和便于脱模，选用合适的润滑剂是很重要的。模锻实践证明，采用 295 硅脂作为润滑剂效果较好。使用润滑剂时，应注意适量而均匀地涂抹，以免产生折叠等缺陷。

④ 超塑性模锻成形操作过程：操作过程大致分为以下几个步骤：a）坯料和模具冷抹润滑油脂；b）坯料入模，加热到 250℃，并根据坯料大小保温一段时间（10 ~ 30 min）；c）加热成形；d）取出成形零件。

5）关于组织和性能问题　Zn - 22Al 合金经超塑性处理后获得超细晶粒组织，但其强度不高（σ_b = 280 MPa，HV = 75）。若增加 Cu 0.2% 后，则强度有所提高，σ_b 约为 330 MPa。为了进一步提高这两种合金的强度，可以进行适当的热处理，以调节其晶粒大小，达到强化的目的。热处理可采用等温淬火及控制连续冷却速度等方法。

Zn - 22Al 合金在变形前为等轴超细晶粒的两相组织，晶界较直。变形后晶粒长大，晶粒变圆滑了。可见晶界在变形中起较大的作用。

（2）铜基合金超塑性挤压

HPb59 - 1 黄铜的硬度大，强度高且耐磨，是一种应用广泛的材料。对于形状复杂，特别是不对称的、精度要求高的零件，难以用某些普通工艺进行成形。为了提高金属材料的利用率及模具寿命，降低锻压设备的吨位，提高零件的精度及降低粗糙度，采用了超塑性成形技术。例如图 6.4-19 所示的“衬套”零件，由于其形状不对称，在偏离中心的位置上带有两个凸台，而在零件的下面则有直角形状，如果采用一般的挤压工艺，成形是极为困难的。然而，采用超塑性挤压成形的方法不仅可一次成形，其经济效益也是相当显著的。与原来所用的机械加工方法相比，不仅可节约 75% 的黄铜材料，而且节约工时，从而降低成本 27%。用国产工业用的材料 HPb59 - 1 黄铜，经过预处理，在温度 620℃恒温挤压成形。

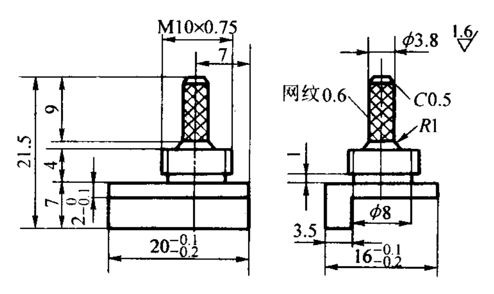


图 6.4-19 黄铜衬套零件图

（3）钛合金超塑性模锻

由于航空和航天工业的发展，钛合金因其具有比强度高、耐热性好、断裂韧性和抗应力腐蚀性能好的优点，应用日益广泛。此外在食品、化工、造船、海洋及医药等工业部门的应用也日益增加。但是，由于这些合金的变形抗力高，塑性差，具有不均匀变形所引起力学性能各向异性的敏感性，难于机械加工及成本高等特点，所以用一般方法很难成形或成形后的质量不理想。只有采用超塑性成形技术才能克服上述困难，而进一步提高零件的质量。图 6.4-20 为用普通模锻和超塑性模锻获得同一涡轮盘锻件（钛合金）的工艺比较。表 6.4-5 列出了两种模锻方法的主要工艺参数。

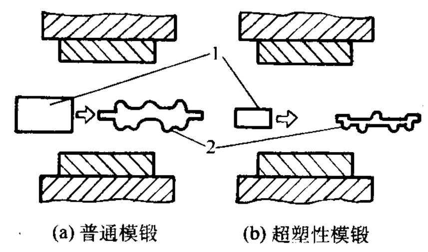


图 6.4-20 两种模锻工艺的比较

1—毛坯；2—锻件

表 6.4-5 两种模锻工艺的比较（钛合金涡轮盘锻件）

工艺参数	普通模锻	超塑性模锻
毛坯加热温度/℃	940	940
模具加热温度/℃	480	940
变形速度/mm·s^{-1}	12.7 ~ 42.3	0.025
平均单位压力/MPa	500 ~ 583	117
模锻时工步次数	4	1

钛合金的常规锻造温度范围约为 100℃，这给实际生产带来许多不便，要多次加热，多次锻造才能完成。因而有可能使变形不均，个别部位晶粒粗化而影响性能。而且导热性差，变形热效应严重，使锻件个别部位的温度实际上超过 β 相变点，导致锻件内部组织不均匀。另外，薄断面锻件锻造时，存在模具的激冷效应，致使锻坯温度迅速下降，可使变形抗力提高 3 ~ 5 倍。因此钛合金采用常规锻造难以得到高精度的锻件和形状复杂的零件。Ti - 6Al - 4V、Ti - 8Al - 1Mo - 1V 等钛合金均可在 α + β 相区进行等温转变时，保持微细晶粒，具有超塑性。Ti - 6Al - 4V 合金具有优良的力学

性能，而且可以不用特殊的处理，在900~950℃可使伸长率达1 000%，有时可达2 000%，用现有的锻压设备就可以进行超塑性成形。

某航空单位研制的TC4钛合金整体涡轮盘（图6.4-21），其盘件的直径为93 mm，带叶片的外径为120 mm，叶片为变截面的直叶片，仰角较小，形状较复杂。这类零件按传统的加工方法是，采用锻件的饼坯经电加工而成形。现在采用超塑性模锻成形，所用的模具为镶块组合结构，毛坯直径为92 mm，成形温度为920℃，为了防止模具氧化，加热时通氩气保护。在6 300 kN油压机上整体模锻，仅1 500 kN模锻力，就可一次精锻成形，变形力仅相当于普通模锻的1/5~1/10。

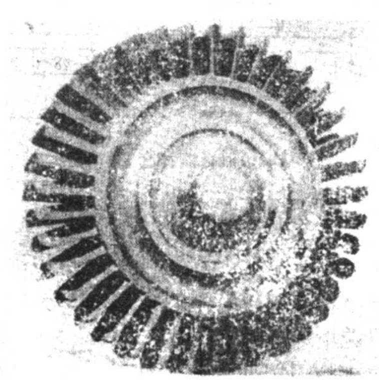


图6.4-21　超塑性模锻的TC4钛合金整体涡轮

毛坯在电炉里加热到920℃，保温40 min后出炉，放入温度约为920℃的模具中进行超塑性等温模锻，成形后，锻件连同镶块一起出模，分离镶块，取出锻件。

整体涡轮超塑性等温模锻的初始阶段是盘件部分的镦粗过程，金属流动应力较小，应变速率较快。当金属开始充填叶片型槽时就转为压入过程，金属的流动应力随着增大，因此变形速度愈来愈低，进入超塑性变形速度范围，在最后3 mm压下过程中，变形速度降至0.02 mm/s，实质上金属是处于蠕变成形阶段。

在非等温模锻条件下，TC4钛合金粗锻时的单位压力约为420 MPa，半精锻时约为800 MPa。精锻时的单位压力更大，一般来说，比半精锻大一倍。而形状十分复杂的整体涡轮，超塑性等温模锻所需的单位压力，即使按冲头面积计算（即叶片投影面积忽略不计），也只需220 MPa，可见超塑性等温模锻在减小变形抗力方面是极为有效的。

前苏联的超塑性模锻BT3-1和BT22钛合金叶片，模锻温度950~970℃，模锻设备用塑料制品液压机改装而成，公称压力为1 000 kN，滑块速度范围为0~120 mm/s，模锻平均单位压力70~90 MPa，相当于普通模锻和挤压的1/5~1/8。超塑性模锻叶片的材料利用率达83%~90%，而原工艺的不超过32%~40%。

（4）高温合金超塑性模锻

高推重比的发动机要求较高的涡轮前温度。这对涡轮盘材料及其成形工艺提出了新的要求。由于高温合金的工艺塑性低、变形抗力大，用普通锻造方法成形非常困难，甚至是不可能的。例如IN-100高温合金具有强度高、塑性低和变形抗力大的特点，很难进行模锻。美国普拉特-惠特尼公司采用超塑性模锻，生产出带叶片的整体涡轮。其工艺如下：首先将IN-100合金铸锭分别在1 145℃（挤压比16:1）和1 093℃（挤压比为16:1）两次挤压成形，使合金具有极细晶粒组织，然后将毛坯加热至1 037~1 093℃进行超塑性模锻（模具上涂有玻璃润滑剂和采用惰性气体保护），模锻变形速度为0.25 mm/s。涡轮盘直径为132 mm时，压力为400 kN；模锻直径为152 mm时，压力为600 kN。

美国近年来研制了一种新型高温铸造合金TAZ-8A，无可锻性，但采用超塑性模锻可锻出涡轮叶片。其工艺如下：将直径25.4 mm的细晶粒圆毛坯加热到1 093℃，在加热的锻模中进行等温模锻，一次变形量可达75%，模具采用粗晶的TAZ-8A合金精密铸造模。

高温合金超塑性模锻成形后，可通过固溶和沉淀等热处理方法恢复到所要求的机械性能。

2.4　超塑性模锻的锻件图设计

超塑性模锻的锻件图根据零件图设计，它是制定工艺规范、设计模具、检验锻件的依据。设计时，应考虑下列问题。

1）根据零件的形状，确定锻压方法，如开式模锻、闭式模锻、正挤、反挤或复合挤压等，然后设计锻件图。

2）模锻斜度。模锻斜度的选定，既要保证锻件取出方便，又要节省金属材料和机械加工工时。高度较小的部位，可不留模锻斜度；高度较大的部位则应有适当的模锻斜度（图6.4-22的a处）。模锻斜度$<1°$。

3）圆角半径。超塑性模锻时，金属易于充满型腔，锻件不同断面的过渡部位允许有锐角，但为了便于金属在型腔内流动和考虑模具强度，亦可以带有小圆角（$R=0.5$ mm）。

4）锻件的内孔。锻件有内孔时，通常可在毛坯上预先钻个孔，然后在成形时利用凸模挤出所需的孔。但为了简化毛坯加工程序和节约材料，可不预先钻孔，挤压时在孔底或孔中间留一层较薄的连皮（$h=2\%\sim4\%d$），最后用机械加工切掉。对于零件图上直径较小，高度较深的孔，一般不宜直接挤出。

5）超塑性模锻后需要机械加工的部位，如图6.4-22所示的a和b面，都应留加工余量。

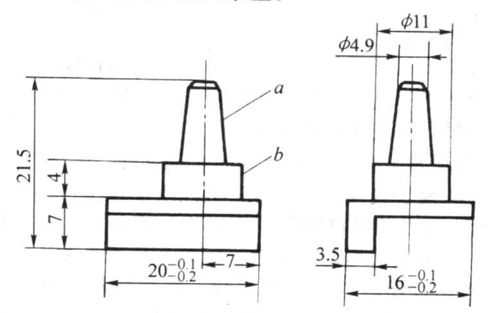


图6.4-22　HPb59-1黄铜衬套锻件图

6）由于锻造温度、出模温度的变化，同一零件的不同部位，收缩率也不完全相同。收缩率按下式确定

$$\alpha_{实际}=\alpha_{材料}-\alpha_{模具}$$

一般取$\alpha_{实际}=0.3\%\sim0.4\%$。

2.5　超塑性模锻的模具结构及材料

（1）模具结构

超塑性模锻要求模具必须加热到与毛坯相同的温度并保持恒定才进行模锻。对于成形温度比较低的锌基、铝基及钢基超塑性合金的模具，可用电阻丝炉加热，模具上下用隔热板将模具与机床隔热。由于超塑性模锻模具所承受的平均单位压力较低，不必采用冷挤压模那样的预应力圈。同时为了简化模具结构，提高导向精度，考虑到热胀冷缩不均匀的问题，模具一般不采用导柱、导套导向，而采用模口直接导向。图6.4-23为HPb59-1黄铜衬套零件超塑性模锻的模具。模具放在内径为200 mm的电炉5中央，模具和电炉均安装在垫板7上，垫板上有一块石棉垫板6用于隔热，垫板固定在油压机工作台上。模具4和成形件的温度通过热电偶和控

温装置进行控制。压力机的行程可用限程块 1 进行控制。卸料时，利用压力机的顶出装置使顶杆 8 上升将锻件顶出。顶出脱模时，锻件处于较软状态，极易变形，不宜采用几根小顶杆直接将锻件顶出，而采用整个下模将整个锻件大面积顶出。为了减少和避免出模时的变形，有时可采用降低锻件的温度以提高其强度的办法。下模与凹模之间一般采用基孔制二级精度配合，它们之间的间隙为 0.03 ~ 0.06 mm。由于在超塑性成形过程中，可能产生飞刺，因此，应使飞刺产生在最后成形的部位。

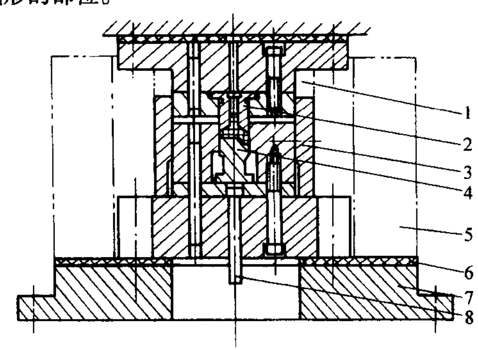


图 6.4-23　黄铜超塑性模锻的模具

1—限程块；2—上模；3—导向套；4—下模；
5—电炉；6—石棉垫板；7—垫板；8—顶杆

对于钢、钛合金、高温合金等超塑性成形温度较高的模具，采用中频感应加热较为合适，可以缩短加热时间，减少氧化和污染，并能提高生产率。图 6.4-24 为 TC4 整体涡轮盘超塑性模锻模具。整个模具安装在 SYF1 - 100 型液压机上，为了防止设备过热，模具与工作台之间应安放通水冷却的垫板。中频感应加热，电源采用 290 kW/250 Hz 晶闸管变频装置，使用功率 18 ~ 30 kW，频率 800 Hz，电压 250 ~ 400 V，电流 150 ~ 200 A，感应器采用直径 220 mm、高 150 mm 的单圈感应器，凸凹模均在感应圈磁场之内同时加热。通过液压升降装置，调节感应器高度，以控制上下模温度。

(2) 超塑性模锻的模具材料

锌基合金、镁基合金、铝基合金和黄铜的超塑性锻造温度范围在 250 ~ 700℃以下，因此，采用一般模具钢，如 Cr12、

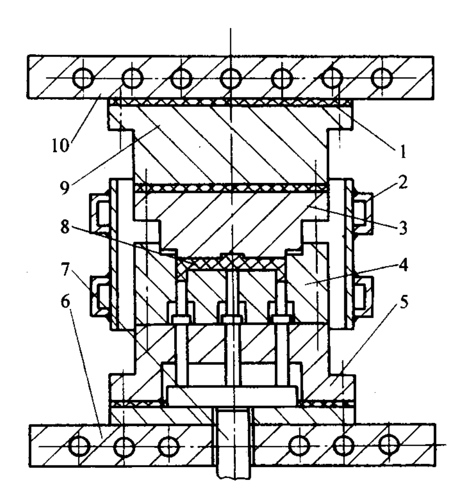


图 6.4-24　TC4 整体涡轮盘超塑性模锻模具和中频感应加热装置

1、5、9—隔热板；2—感应器；3—凸模；4—凹模
6、10—水冷板；7—顶出器；8—工件

Cr12Mo、Cr12MoV、T 8、T10、GCr15、3Cr2W8、5CrMnMo、W6Mo5Cr4V2、P18 和 45 钢等。热处理后硬度大于 56HRC 均可满足强度的要求。但钛合金和高温合金超塑性模锻的温度范围大多在 800℃以上，因此对模具材料的要求很高，如对高温强度、抗蠕变性、耐磨性、红硬性、耐热疲劳性、抗氧化性能、冲击韧度、淬透性和导热性都有更高的要求。

目前生产上已用于超塑性模锻的模具材料大多是铸造镍基高温合金，如 IN - 100、MAR - M200（美国牌号）、ЖC6 - K、K3、K5 等，也有采用钼基合金 TZM（美国牌号）。当温度超过 500℃时，由于钼的氧化较严重，因此需采用氩气保护。铸造合金不易机械加工，故通常采用精密铸造方法制造模具。假如制造复杂形状的模具，最后还要用电火花加工出所需要的形状，也可用粉末冶金的方法制造模具。如果锻造温度更高，将来可能采用耐热金属为基的陶瓷、金属陶瓷和玻璃纤维等作模具。

这些铸造高温合金的化学成分列于表 6.4-6。

表 6.4-6　超塑性锻模用的铸造高温合金的化学成分（质量分数）　%

合金	Al	C	Cr	Co	Fe	Mn	Mo	Ni	Si	Ti	其　他
Inconel - 100	5.5	0.18	9.5	15.0	0.5	0.1	3.0	其余	< 0.15	4.8	< 0.015P；0.015S；0.95V
Inconel - 718	0.6	0.10	19.0	—	其余	< 0.50	3.1	52.5	0.75	0.8	< 0.75Cu；5.1Ta
Inconel - 713G	6.0	0.12	13.0	—	1.0	0.15	4.5	其余	0.4	0.6	2.25Nb；0.005 ~ 0.002B；0.05 ~ 0.2Zr
Hastelloy	—	0.10	21.8	1.5	18.5	< 0.1	9.0	其余	< 1.0	—	< 0.04P；< 0.03S；0.6W
MAR - M200	5.0	0.15	9.5	10.0	< 1.5	0.2	—	其余	< 0.2	2.0	0.015B；1.0Nb；12.0W；0.06Zr
Udimet 500	2.9	0.08	19.0	19.0	< 4.0	< 0.75	4.0	其余	< 0.75	2.9	0.06Zr
Udimet 700	3.45 ~ 4.75	0.15	13 ~ 17	17 ~ 20	< 1.0	—	4.5 ~ 5.75	其余	—	3.0 ~ 4.0	0.1B
TZM	—	0.03	—	—	< 0.01	0.008	其余	< 0.002	—	0.48	< 0.005H_2；< 0.002 5O_2
TAZ - 8A	6	0.125	6	—	—	—	4.0	其余	—	—	0.004B；1Zr；8Ta；4W；25Nb
ЖC6 - K	4.2 ~ 5.0	0.1 ~ 0.16	9 ~ 11.5	5 ~ 8	≤2.0	—	4 ~ 6	其余	—	2.4 ~ 3.3	≤ 0.03B；≤ 0.015Ge；3 ~ 5W
K3	5.3 ~ 5.9	0.11 ~ 0.18	10 ~ 12	4.5 ~ 6.0	—	—	3.8 ~ 4.5	其余	—	2.3 ~ 2.9	4.8 ~ 5.5W；0.01 ~ 0.03B；0.01 ~ 0.03Cr；0.1Zr

续表 6.4-6

合金	Al	C	Cr	Co	Fe	Mn	Mo	Ni	Si	Ti	其　他
K9	5.75 ~ 6.20	0.08 ~ 0.13	7.5 ~ 8.5	9.5 ~ 10.5	< 0.35	< 0.20	5.75 ~ 6.25	其余	< 0.25	0.85 ~ 1.20	≤0.10W；≤0.10Nb；4.0 ~ 4.5Ta；0.01 ~ 0.02B；0.05 ~ 0.10Zr
K19	5.3 ~ 5.7	0.09 ~ 0.14	5.5 ~ 6.3	11 ~ 13	—	—	1.7 ~ 2.3	其余	—	1.1 ~ 1.5	9 ~ 10.5W；2.5 ~ 3.7Nb；0.04 ~ 0.10Zr；0.05 ~ 0.10B

2.6 润滑

在超塑性模锻过程中，润滑对锻压力、锻压时间、金属抗力、成形件质量、锻件表面及后续表面处理都有影响。因此，润滑剂应满足下列要求：

1）金属变形时能将成形件和模具表面隔开；
2）随金属表面变形而流动；
3）低的摩擦系数，减少金属流动阻力；
4）保护锻件不被氧化；
5）不与锻件或模具产生作用，清除容易；
6）在模具中积存较少；
7）脱模性能好。

锌基、铝基和铜基合金超塑性材料在锻压时所使用的润滑剂与常规锻造时一样，主要是硅脂、硅油、胶体石墨和二硫化钼等。

高温合金和钛合金超塑性模锻的润滑剂多采用玻璃润滑剂或玻璃加石墨。

3 等温模锻

3.1 等温锻造的基本特点和发展动向

等温模锻是指将模具、毛坯都加热到锻造温度，在锻造过程中，坯料和模具温度基本上保持不变的锻造方法。等温模锻工艺对锻造毛坯的组织状况和变形速度没有特殊要求。这种工艺减少或消除了模具激冷和材料应变硬化的影响，大大减小了变形抗力，提高了坯料的成形性能，可以生产出满足复杂零件要求的精密锻件。

随着航空工业的迅速发展，将更多地使用钛合金，以及高温合金及粉末合金等。但是由于这些合金的锻造温度范围窄、变形抗力大，用常规的模锻方法困难重重。钛合金的流动应力随着变形温度的降低或变形速度的增加而迅速增大，因此，等温锻造尤为适用于这些材料。钛合金等温模锻要求模锻温度保持在 760 ~ 980℃范围内。毛坯放入模具后，液压机以预先选定的较小压力进行压缩，压力机的工作速度由毛坯的变形抗力自动调节。在变形温度、变形速度和毛坯晶粒度达到合适的条件时，等温锻造可能在超塑性状态下进行。Ti－6Al－6V－2Sn 在 β 相变温度附近的流动应力大约减少 70%（图 6.4-25）。其他牌号的钛合金在相应锻造温度下也发现同样的变化趋向。由于这一优越性，等温模锻已成为当前国内外钛合金锻件生产工艺的发展方向。

等温模锻铝、镁合金加工领域早已获得应用。如美国渥曼·高尔顿公司生产的铝锻件差不多全是等温模锻的精锻件。

欧美等国在钛合金等温模锻方面取得了较大的进展。例如：美国 F－15 飞机的水平安定面的扭力肋条，使用了 Ti－6Al－4V 的等温模锻件。这个零件重 2.3 kg，锻件质量从原来的 18.1 kg 减少至 9.2 kg，机械加工的费用降低 27%；此外，还有 F－111 飞机的前起落架轮，使用了 Ti－6Al－6V－2Sn 等温模锻件。美国某空军基地使用的 Ti－6Al－4V 钛合金飞机隔框的等温模锻件，重量仅 22.7 kg，而普通模锻件的重量为 158.8 kg，每件节省材料 136 kg。美国普拉特·惠特尼公司等温模锻的 Ti－6Al－4V 钛合金叶片，其榫头也基本不需机械加工。据资料报道，该公司为 F100 发动机生产了 Ti－8Al－1Mo－1V 风扇叶片的等温精密模锻件。

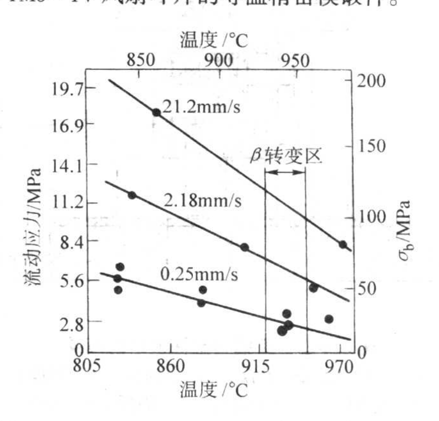
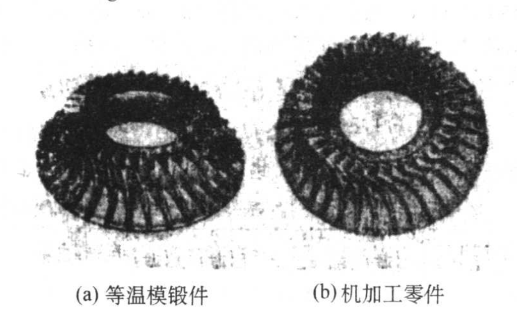


图 6.4-25　Ti－6Al－6V－2Sn 合金在等温模锻条件下变形速度和温度对流动应力的影响

美国军工材料－机械研究中心，为直升飞机的风扇叶轮锻成了 Ti－6Al－4V 钛合金等温模锻件，如图 6.4-26 所示。风扇叶轮锻件直径为 340 mm，叶片厚度为 4 mm，质量为 10 kg。原用普通模锻件，其质量为 24 kg，加工后的风扇叶轮净重为 4.8 kg。



(a) 等温模锻件　　(b) 机加工零件

图 6.4-26　等温模锻 Ti－6Al－4V 合金工作叶轮

前苏联的 BT3－1 和 BT22 钛合金叶片用等温模锻，使叶片的材料利用率从常规模锻的 32% ~ 40% 提高到 83% ~ 90%。

我国近二十年来在钛合金等温模锻领域开展了大量的工作，航空研究院所与锻造企业厂已锻出了 34420TC11 压气机盘、TC4 整体涡轮、TC4 前轴颈、Ti－1023 接头等多种等温模锻件，有的锻件已装机使用。

3.2 等温模锻的工艺装备

等温模锻的工艺装备与前述超塑性模锻的工艺装备基本相同。通常如图 6.4-27 所示。下面讨论各组成部分。

1）设备。等温模锻要求缓慢成形，因此变形设备通常采用液压机。液压机的规格，可根据等温模锻的变形力选定。大体上等温模锻的单位压力为普通模锻的 1/5 ~ 1/10。

液压机的工作空间尺寸应满足模具加热装置安装的要求，开启高度应保证更换模具时勿需从液压机上卸下整个模具装置。



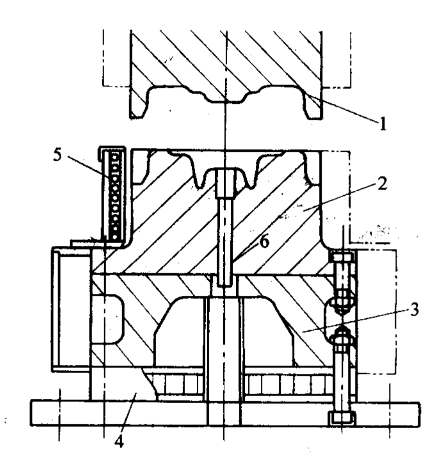


图 6.4-27 等温模锻工艺装备示意图
1—上模；2—下模；3—隔热板；4—水冷板；5—感应圈；6—顶料杆

2）模具。由于等温模锻需将模具加热到毛坯的锻造温度，这就必须相应解决一些问题。铝镁合金的变形温度低，用5CrNiMo、3Cr3Mo3VNb等一般的模具钢作为等温锻模具材料就能满足要求。钛合金和高温合金的等温锻，则需寻找高温下能够长期稳定可靠工作而且不氧化的模具材料。一般应选择耐热性良好的合金作模具材料，目的是使其在等温锻造温度下的力学性能高于模锻材料的相应性能。尤其是模具材料的屈服强度，至少应为模锻材料屈服强度的三倍。英、美等国在锻造钛合金时，用得较多的模具材料为：Inconel-713C、IN100、MAR-M200、Udimet700等，前苏联则用铸造镍基高温合金 ЖС6-К、ЖС6-У、ЛI114。我国目前根据材料资源的情况，较多地选用K3铸造高温合金作为等温模锻钛合金用的模具材料，上述模具材料的化学成分列于表6.4-7中。

模锻材料是根据等温锻造的合金牌号和锻件的产量决定的。选用高级的高温合金在经济上要作具体分析，在锻造小批量锻件时，一般可选用较低级的合金。

表 6.4-7 模具材料的化学成分（质量分数）

合金	合金元素/%										
	Al	C	Cr	Co	Fe	Mn	Mo	Ni	Si	Ti	其他
Inconel713c	6.0	0.12	13	—	1	0.15	4.5	余量	0.4	0.6	2.25Nb，<0.02B，<0.2Zr
Inconel718	0.6	0.1	19	—	余量	<0.5	3.1	52.5	0.75	0.8	<0.75Cu 5.1Ta
IN100	5.5	0.18	9.5	1.5	0.5	0.1	3	余量	<0.15	4.8	0.015B，<0.015S 0.95V
MAR-M-200	5.0	0.15	9	10	<0.5	0.2	—	余量	<0.2	2.0	0.015B 1.0Cb，12.5W 0.06Zr
Hasielloy X	—	0.1	21.8	1.5	18.5	<0.1	9	余量	<0.1	—	<0.04P <0.03S，0.6W
Udimet500	2.9	0.08	19	19.5	<0.4	<0.75	4	余量	<0.75	2.9	0.06Zr
Udimet700	3.75~4.75	<0.25	13~17	17~20	<1	—	4.5~5.75	余量	—	3.0~4.0	0.1B
ЖС6-К（K3）	5.5	0.16	11	4.5	<2	<0.4	4	余量	<0.4	2.75	0.02B
TZM	—	0.03	—	—	<0.01	0.008	余量	<0.00	—	0.48	<0.000 5H <0.002 8O
X-40（钴铬钨合金31）	—	0.5	25.5	余量	<2	1.0	—	10.5	—	<1.0	<0.04P <0.04S 7.5W

高温合金、粉末合金等的等温模锻由于变形温度超过1 000℃，所以不宜选用一般的铸造高温合金作模具材料，而要选用高熔点金属（如钼合金）或金属陶瓷作为模具材料。钼合金在大气中使用，500℃时就开始氧化，因此钼合金模具必须在真空或惰性气氛中使用。最近，用陶瓷作为模具材料有了新的进展。其强度、韧性低和收缩率大的弱点已有所改善。例如以高纯度的人造氧化铝（添加少量氧化铬和氧化钛）为基体，加入10%~15%的石蜡作为增塑剂，压力浇注成形、焙烧、化学处理和多次浸渍，获得了如表6.4-8所示的良好效果。由于陶瓷材料在这方面的重大进展，再加上它原有的工作温度高（1 600℃）、抗蚀性好和成本低等优点，因此可以预计获得更大的发展。

表 6.4-8 氧化铝陶瓷的性能

焙烧收缩率/%	抗压强度/MPa	抗弯强度/MPa	冲击韧度/$J\cdot m^{-2}$
0.01~0.05	294~392	98~441	1 176~2 157

铸造高温合金是一种昂贵的材料，切削加工较困难，因此应采用精密铸造制造，以便经过少量加工即可投入使用。

采用熔模精密铸造，K3 合金的浇注温度可控制在 1 470℃左右。合金铸造性能良好，铸造收缩率为 2.3%，模具铸出后再机械加工其配合面和型槽表面。

与普通模锻相比，等温模锻的锻模设计还有以下几点明显的差异。

① 需考虑模具精密铸造过程中金属的收缩率。

② 需考虑锻模加热时的膨胀问题。在确定型槽尺寸时，必须注意锻模材料与变形金属线膨胀系数的差异。

③ 等温模锻时，飞边部分的温度保持不变，因此不能明显起到普通模锻中飞边的封闭作用。为此，等温模锻的飞边槽桥部的高度应尽可能减小，以保证金属在型槽内充填良好。

④ 在使用陶瓷材料作模具时，应保证处于三向受压状态。

⑤ 根据具体情况，可适当减小或不留锻件的加工余量。例如，在真空或惰性气氛中进行等温锻造时，可获得表面光洁的锻件，非配合面一般不需要机械加工。由于等温状态下合金的流动性好，因此肋的高度、模锻斜度、圆角半径、腹板厚度等模具结构参数可大为减小。两种模锻工艺所采用的模具结构参数，列于表 6.4-9 中。

表 6.4-9　等温模锻和普通模锻的结构参数

参数	普通模锻	等温模锻
模锻斜度/(°)	5	0～1
外圆角半径/mm	22	10
内圆角半径/mm	10	3.3
欠压量/mm	0.76～3.3	0～1
错移/mm	1.27	0.51
歪曲/mm	1.52	0.38
长度和宽度公差/mm	±1.0	±0.38
肋的厚度/mm	12.7	2.5～3.2

⑥ 由于锻模温度很高，所以在锻模和液压机上、下台面之间应采取隔热措施。

3）加热装置。等温模锻的模具加热方法主要有电阻式和感应式两种。

以电阻元件加热模具，一般采用硅碳棒或电阻丝作为加热元件。硅碳棒的电阻率较大，即使有温度控制措施，也难免使模具表面温度偏高。此外，若变形速度快或操作不慎，硅碳棒容易损坏，因此用电阻丝作为加热元件较为合适。

电阻炉的结构形式要由模具的结构决定。一般来说，最好是上、下模各设一个加热器，以便温度分别控制。为了在模锻过程中防止分模面降温，应加一个圆环形的加热装置，见图 6.4-28 所示。圆环形加热装置可通过螺栓随上模加热装置作上下运动。当环形加热装置接触到下加热装置时，上模和上加热装置在环形加热装置内还可以往下移动一定的距离。这一距离正是模锻的工作行程。这种加热装置可使模具温度在模锻过程中基本保持均匀。图 6.4-28 所示的装置可以加热直径为 240 mm、质量为 130 kg 的模具，从室温加热到 920℃约需 1.5 h，加热装置的总功率为 15 kW。三个加热装置由三个调压器分别控制，可根据需要调节电压，使模具始终保持所需温度。这套装置经实际使用，效果较好，热效率较高。

电阻丝加热装置投资少、制造简单，但它的主要缺点是靠传导和辐射来传递热量，模具愈大，效率愈低，升温时间愈长。因此，这种方法适用于中小型模具。另外，在连续使用过程中，电阻丝容易烧损而断裂，或容易与模壁接触而短路。

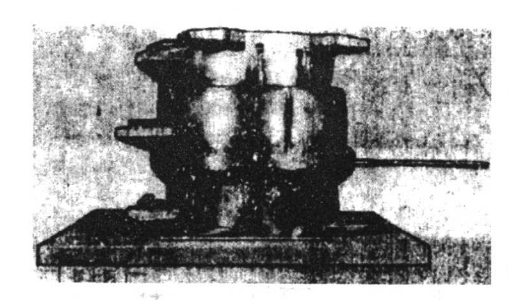


图 6.4-28　具有三个电阻加热装置的外形

感应加热有其独特的优点，当感应圈输入交变电流时，模具由于交变磁场的作用，产生感应电流，从而达到自身加热的目的。由于"集肤效应"，模具直径不大时可采用中频感应加热。当直径大于 150 mm 时，应采用工频感应加热。

工频感应加热装置的计算方法很多，有电感法、电磁法和涡流法等。计算方法不同，其结果也有所差别，其计算步骤大致相同：先计算模具重量，然后进行热工（加热模具所需的热量及功率等）、电工（感应圈的直径、匝数、电流、电压及功率因数等）计算并确定供电方案，最后计算平衡电容、补偿电容的容量、导磁体尺寸及冷却水等。

图 6.4-29 是一套工频感应加热装置。它可用来加热外径为 ϕ230 mm，重 207 kg 的 K3 合金精铸模，加热到 920℃仅需 70 min，此时的有效功率为 30 kW。此装置使用三相电流，一相（AB 相）加热模具，其余二相为平衡装置。根据电感法计算而得的主要数据列于表 6.4-10 中。

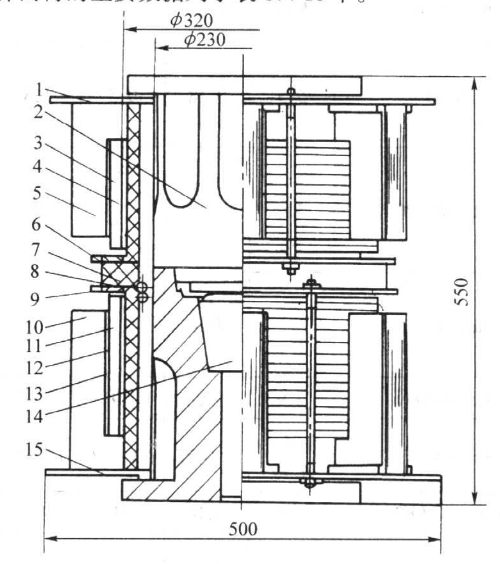


图 6.4-29　工频感应加热装置

1—上底板；2—上模；3—隔热层；4—上感应圈；5—上导磁体；6—上压板；7—隔热圈；8—氩气管；9—下压板；10—下导磁体；11—下感应圈；12—隔热层；13—下模；14—顶杆；15—下底板

表 6.4-10　工频感应加热装置参数

参数	数值
模具质量/kg	207
模具直径/mm	ϕ230
加热模具所需热量/kJ	24 219×4.18
感应圈匝数/N	40
感应圈内径/mm	ϕ320
感应圈钢管截面尺寸/mm	15×5，壁厚 1.5



续表 6.4-10

参数	数值
自然功率因数 cosφ	0.334
加热模具的时间/min	70
加热功率/kW	28.9
感应圈端电压/V	134
感应圈电流/A	762
补偿电容/kF	780
导磁体截面积/m^2	0.010 5
感应圈电流密度/$A\cdot mm^{-2}$	13.3

3.3　等温模锻对润滑防护剂的特殊要求

等温模锻对润滑防护剂的要求比普通模锻高，润滑防护剂对等温模锻工艺的成败起着关键性的作用。

等温模锻所采用的润滑剂应满足以下几点。

1）能使模具与毛坯间生成连续均匀而致密的薄膜，起分离作用。

2）能减小摩擦系数和变形抗力。

3）不应使锻件和模具表面受腐蚀。

4）使锻件容易从模具内取出，润滑防护剂易于从模具和锻件表面清除。

5）加热时，能保护毛坯表面，避免氧化。

润滑剂种类很多，一般有玻璃、熔融状态的盐、皂土与云母为基的润滑剂等。根据国内外有关资料报道，目前在冶金、机械等工业上广泛应用有“白石墨”之称的氮化硼作为绝缘、润滑和脱模剂。氮化硼属于六方层状结构，具有膨胀系数小、耐热性和抗氧化性高等优点。氮化硼另一个突出的特点是与碱性氧化物和水混合加热时，很容易发生化学反应，产生一种泡沫状的灰白色疏松物，有助于脱模。玻璃类润滑剂对陶瓷模有腐蚀作用，因此应改用其他合适的润滑剂。

Ti－6Al－4V 的等温模锻试验中曾采用涂敷双层玻璃润滑剂：第一层 90%GL－17＋10%云母粉，主要起润滑作用；第二层 80%GL－17＋20%BN，主要起脱模作用。采用上述熔融玻璃作润滑脱模剂，可锻出比较满意的锻件，但润滑剂在型槽内堆积问题仍有待解决。

3.4　典型件的等温模锻工艺

（1）TC6 钛合金作动筒筒体

某航空发动机上的 TC6 作动筒筒体（图 6.4-30），其外径为 60 mm，壁厚为 3.5 mm，深度为 150 mm，零件总长度为 240 mm。用普通模锻只能锻成实心锻件，重 3.4 kg，机械加工后只有 0.6 kg 重，金属利用率为 18%。采用等温挤压，空心的作动筒筒体质量为 1.7 kg，金属利用率增至 35%，成本降低 1/4。

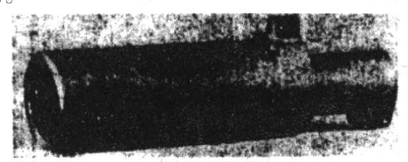


图 6.4-30　等温挤压 TC6 作动筒筒体

空心作动筒筒体的等温挤压在 5 000 kN 油压机上进行，并采用反挤压法以减少模具磨损、降低挤压力和便于脱模，见图 6.4-31。由于锻件导向部分有两个凸台，采用了对开式镶块模。模具材料选用 K3 铸造高温合金。毛坯涂上高温玻璃润滑剂后在电阻炉内加热至 940℃，镶块模从底部送入模腔，然后放入毛坯进行挤压。用碱洗法去除锻件表面的玻璃润滑剂，喷砂去除表面杂物，再酸洗去除富氧层。机械加工后装在某发动机上经受了 252 h 的长期试车，工作情况良好。

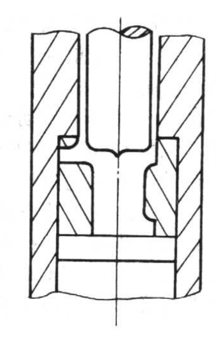


图 6.4-31　等温挤压 TC6 作动筒筒体反挤压模示意图

（2）TC4 钛合金转接座

某航空发动机的 TC4 钛合金电机转接座，原来在 3 t 模锻锤上两火锻成，毛坯重 1.6 kg。后来在 6 300 kN 油压机上等温模锻了一批转接座锻件（图 6.4-32），毛坯质量降至 1 kg，节省材料 37.5%。

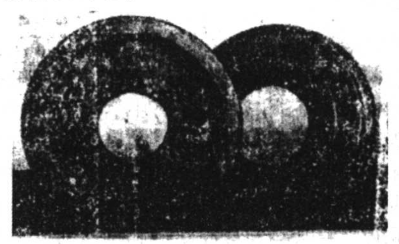


图 6.4-32　等温模锻 TC4 钛合金转接座

该锻件的工艺过程如下：

自由锻毛坯吹砂→喷涂玻璃润滑剂→毛坯加热至 920℃→等温模锻（用工频感应装置加热模具至 920℃）→退火（800℃，1 h，空冷）→吹砂清除锻件上的玻璃润滑剂。

等温过程中的实测数据结果表明，当转接座连皮部分厚度为 2 mm 时，单位模锻压力为 130 MPa。当连皮厚度增至 3～4 mm 时，单位模锻压力减小至 100 MPa，见图 6.4-33。该等温锻件与原普通模锻件的精度对比见表 6.4-11。

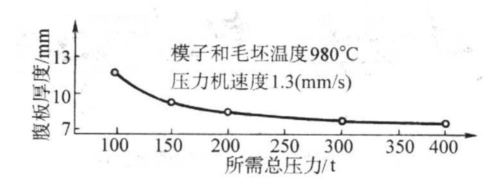


图 6.4-33　等温模锻件腹板厚度与所需设备吨位的关系

表 6.4-11　锻件精度对比　mm

锻件精度	等温模锻	普通模锻
单边余量	1.5	2.5
错移	0.4	1.0
锻件厚度误差	0.21	1.85
锻件圆角半径	1～6	3～10
锻件挠曲度	<0.2	0.45

编写：王高潮（南昌航空工业学院）



第5章　液态模锻

液态模锻是铸锻结合的一种工艺方法，该方法采用铸造工艺将金属熔化、精炼，并用定量浇勺或专用装置将金属液浇入模具型腔或容料室，随后在锻压设备上利用静压力，使液体或半液体状态的金属在模具中流动充型，并在较大的静压力下完成结晶凝固，从而获得力学性能接近纯锻造锻件，而优于纯铸造件的液态模锻的工艺方法。

液态模锻的优点在于：这种工艺方法可在通用的液压机上完成，也可根据产品的工艺特点，在专用的液态模锻压力机上完成。这种工艺方法不仅可以对铸造类合金实施成形。还可以对变形类合金进行成形。这种工艺方法可适用于有色金属和黑色金属。

液态模锻属于少无切削的金属加工方法，对缩短工件的加工周期，减少材料消耗，改善工件内部组织和消除内部缺陷，提高工件的使用性能有明显的效果。

1　液态模锻的工艺原理

1.1　工艺原理

液态模锻是针对铸造工艺中重力铸造、低压铸造、高压铸造等铸造方法易产生的铸造缺陷，如疏松、缩孔、气泡等缺点，提出利用提高静压力对模具中的液态或半液态金属进行压力充型和压力下凝固之前，必须建立起工艺所要求的压力，用以避免由于被成形的金属从液态到固态时的体积收缩可能带来的缺陷。因此，在模具中的金属受压力作用时，存在着体积压缩产生的部分塑性变形和预压力，在压力足够的情况下，才能使被成形的液锻件内部无缺陷产生，从而提高件的综合性能。

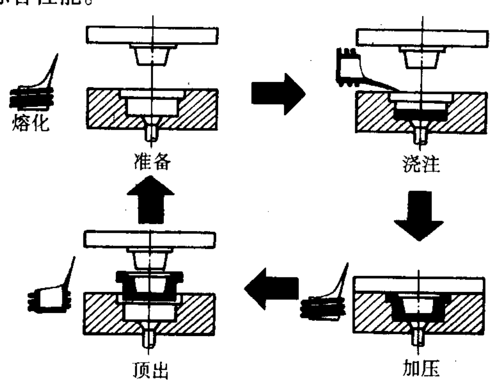


图 6.5-1　液态模锻工艺原理示意图

为确保制件的质量，首先是对金属液体质量的要求，通过合理的熔炼工艺来保证；其次，是合理的加压与充型方式，这与被成形制件的结构形状或者是类型有关，通过成形流动分析，选择合理的模具结构来保证；第三，加压时间及保压时间，以及整个工艺过程的工艺参数的选择与控制，都将决定液态模锻件的成形质量。液态模锻的工艺原理如图 6.5-1 所示。

1.2　液态模锻的工艺流程

其工艺流程如图 6.5-2 所示。

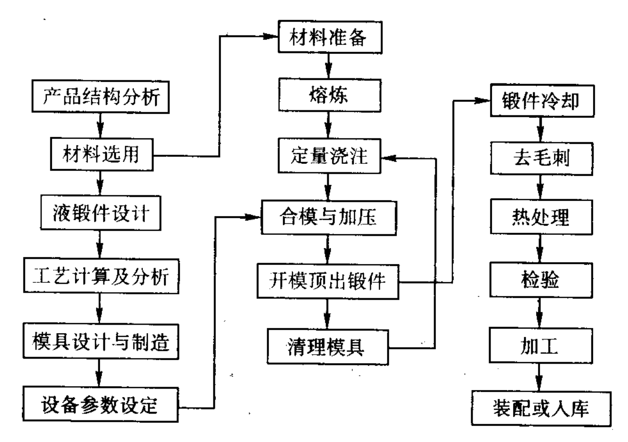
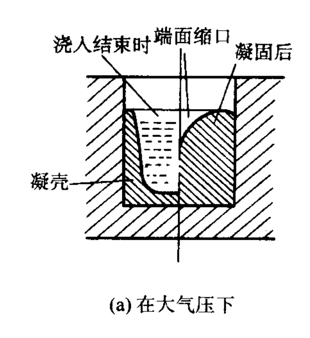


图 6.5-2　液态模锻工艺流程图

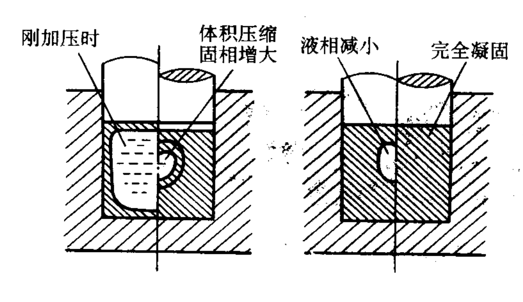
2　液态模锻成形与凝固特点

液锻时，由于模具温度低于液态金属的浇注温度，当液态金属浇入模具后，液态金属与模壁接触产生热交换，传热形式以热传导为主，使模壁温度升高，液态金属与模壁贴靠的表面温度降低，形成表面结晶壳，随时间的延长，液态金属的液固相的体积比例逐步减小，在液锻成形时，要使液态金属在压力下顺利流动成形，把握加载机会是非常重要的。

了解液态金属在模具中的冷却凝固规律，是合理选择和控制液锻工艺参数的关键，通过理论分析和实验探索，液态金属在不加压情况下，金属凝固是由接触面先形壳，最后凝固为自由状态下的上端面，最后在上端面形成锥状缩孔，如图 6.5-3a 所示；在加压情况下，模具内的液态金属在形成的封闭凝壳内，通过足够的压力压缩体积来平衡液态金属的收缩，同时避免收缩造成的各种缺陷，如图 6.5-3b 所示。



(a) 在大气压下



(b) 在静压力下

图 6.5-3　液态金属在模具中的凝固规律示意图



液态模锻时，金属液在模具中的成形一般可分为三种形式：一是静压成形，也称为直接加压法，即金属液在冲头的压力作用下不流动、不增加新的表面积，冲头端面属于平面，直接作用在模具中液态金属的表面上，很快建立起压力，获得形状较简单的液锻件，如图 6.5-4 所示；二是挤压成形，也称为冲头加压法，既液态金属在冲头下行或活塞上行时的直接或间接作用下，有新的锻件表面积产生，一般在模具的上半部分液态金属受挤压流入异形冲头与凹模之间，并在压力下凝固成形，获得有一定复杂程度的液锻件如图 6.5-5 所示；三是间接挤铸成形，既金属液在活塞的推挤下，经过浇道进入各独立的模腔，在活塞的挤压下形成间接压力完成成形，与立式压铸相似，但要求有较大的浇道截面积和较大的液锻挤压力，如图 6.5-6 所示。

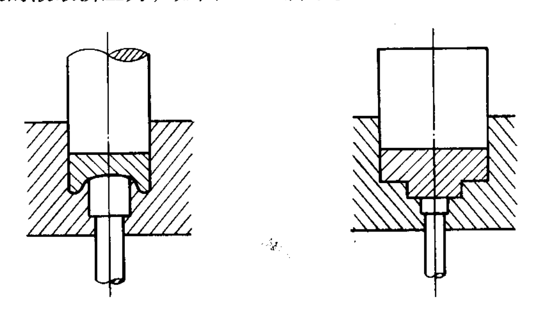
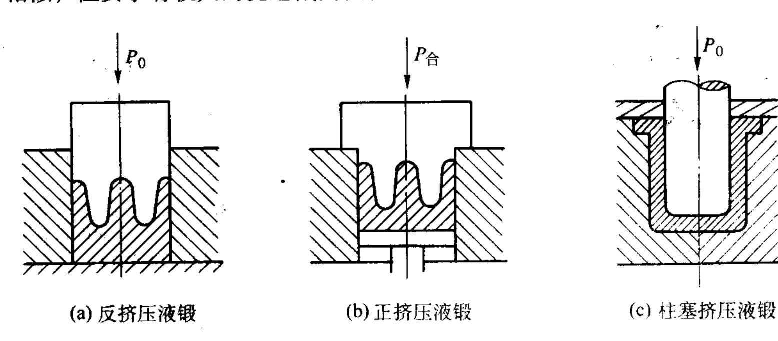
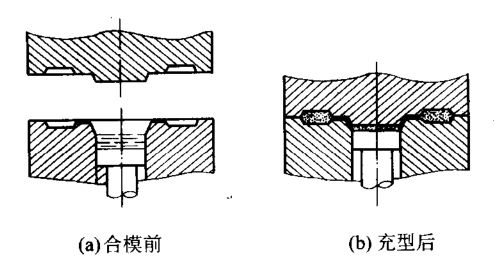


图 6.5-4 静压成形（直接加压）示意图



(a) 反挤压液锻　(b) 正挤压液锻　(c) 柱塞挤压液锻

图 6.5-5 挤压成形（冲头加压）示意图



(a) 合模前　(b) 充型后

图 6.5-6 间接挤注成形

3 液态模锻工艺对设备的要求

3.1 液锻工艺对设备的要求

液态模锻时，液态或半液态金属在浇入模具型腔后，应尽快给予压力，使其充型并在压力下凝固，但所施加的压力应是静压力，而加载速度大的锻压设备会使未凝固的金属飞溅出模，对操作环境带来危险，是不可取的。因此，要保证液锻成形的工艺要求，所选设备应满足以下条件。

1）有足够的压力选择功能，保证液锻成形对压力的要求。

2）有一定的增压速度和保压功能，保证不同液锻件的成形要求。

3）有足够的顶出力和回程拨模力，便于锻件顺利脱模。

4）在特殊需要时应有辅助装置，如辅助水平缸、冷却系统、机械手等。

上述条件，只有液压机类设备可以满足工艺要求。

3.2 液锻设备的选择依据

由于液锻件类型及生产批量的要求不同，选择合适的液态模锻设备对生产效率和经济效益有一定的影响，因此，选择液态模锻设备时主要考虑以下因素。

1）设备压力、回程力和顶出力。液态模锻用压力机应有提供足够的合模力和成形力，一般应具有压力选择和设定功能，以保证不同锻件的成形要求。所选设备的压力应大于最大成形压力，一般成形压力不超过设备额定压力的 80%～90%，还应考虑设备的回程力是否能满足模具主型芯的拔出力；工件留于下模时，还应考虑工件的顶出，以便保证液锻成形工艺的顺利实现。

2）液锻用设备的工作行程。液锻设备的行程是保证液锻成形和成形后锻件顺利出模的关键参数，此外，还应保证模具及相关辅助装置的安装空间。所以，在模具设计时就应考虑所选设备的相关参数，留有足够的行程空间，一般液锻设备的工作行程应大于液锻时所需的行程。

3）设备的工作台面。液锻设备的工作台面主要是考虑模具长宽尺寸的安装，另外，还有辅助装置的安装、调整等，应保证模具牢固定位和正常工作。

4）液锻成形方式对设备的要求。因液锻方式不同，所选用的设备类型也有区别，分型面多而复杂时应考虑多向分型的辅助装置，有抽芯要求时，还应考虑抽芯装置，设备上没有附带这些装置的，应在模具设计时加以考虑，并在设备允许的安装空间里增设这些装置。

5）生产率对设备的要求。液锻方式生产大都是批量较大的锻件，最好能采用专用液锻机或配套完备的通用液锻机。这不仅可保证产品的质量，还可以保证模具的设计有针对性和经济性。

3.3 液锻用成形设备

1）通用液压机。通用液压机是指一般的万能液压机。通常用于冲压、模锻、挤压、粉末压制成形及塑料压制成形等工艺。液态模锻时，对于较复杂的制件如实心、厚壁、环形、杯形类等制件，均可选用通用液压机进行成形。

国产通用液压机为三梁四柱式，如图 6.5-7 所示，有主压力缸和下顶出缸，其型号常有：YB32 系列、YA32 系列和 YT32 系列，需要时可在锻压设备手册查询选用。

2）普通型专用液压机。这种类型的液压机，是根据液锻件成形工艺要求，在通用液压机下工作台面上增设水平或垂直液压缸或相应的机械装置。如图 6.5-8、6.5-9 所示。使

模具的功能与工艺要求一致，实现分型或抽芯的功能，达到生产自动化的要求。

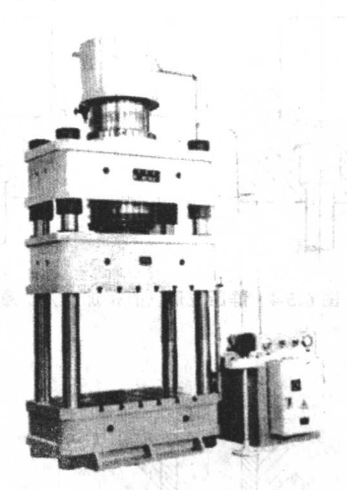


图 6.5-7　国产通用液压机

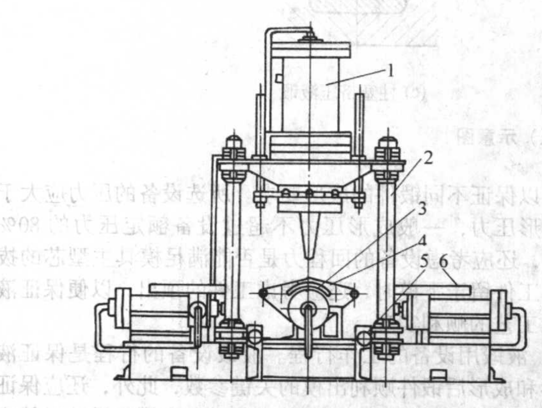


图 6.5-8　带有水平辅助缸液压机

1—主液压缸；2—立柱；3—水平合模液压缸；4—定模板；5—动模传动杆；6—抽芯液压缸

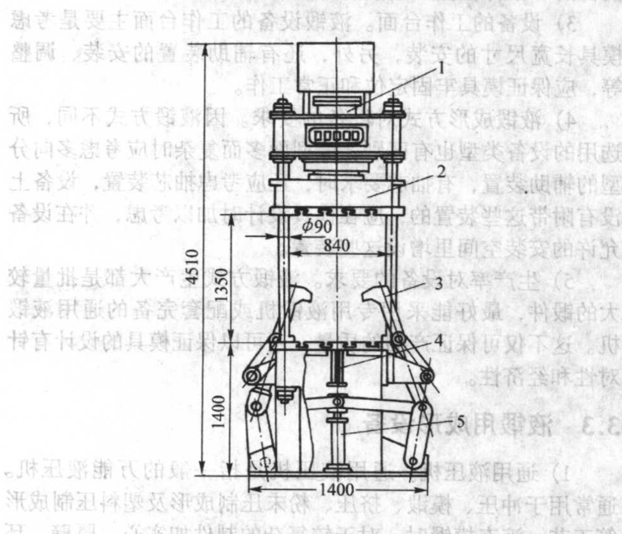


图 6.5-9　带垂直锁模机构的液压机

1—主液压缸；2—活动横梁；3—连杆挂钩；4—顶料杆；5—液压缸

3）万能型专用液锻压机　将水平辅助侧缸和垂直辅助缸同时安装在一台立式液压机上使其同时具有下模水平方向和上模垂直方向的合模与开模力，以立缸为垂直方向施加成形压力，这种功能齐全的液压机被称为万能型液态模锻专用液压机。其典型结构如前苏联 YJIM 型系列万能液压机。如图 6.5-10 所示。YJIM－2 型万能液压机的技术性能参数如表 6.5-1 所示。在产品类型多，分型面复杂时，可以参考已有设备结构，专门订制专用型万能液压机，以满足多品种，大批量、专业化生产的需求。

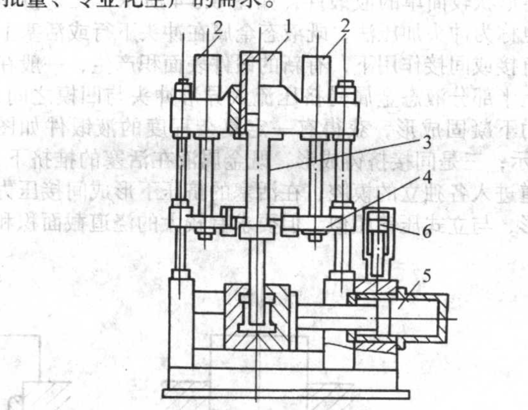


图 6.5-10　YJIM 型系列万能液压机

1—主液压缸；2—辅助液压缸；3—主缸活塞；4—辅助活动横梁；5—侧缸；6—增压器

表 6.5-1　YJIM－2 型万能液压机的技术性能参数

项目	指标
基本压力（主缸压力）	350 kN
增压时压力（主缸压力）	800 kN
主缸回程力	140 kN
辅助缸总压力（垂直缸）	180 kN
增压时辅助缸总压力（垂直缸）	870 kN
辅助缸回程力	30 kN
水平缸压力	350 kN
增压时水平缸压力	800 kN
水平缸回程力	30 kN
主工作缸活塞行程	450 mm
辅助缸活塞行程	350 mm
主缸活塞最大速度	220 mm/s
工作台面尺寸	500 mm × 500 mm
工作液压力	12 MPa（允许 15 MPa）
外形尺寸	2 060 mm × 2 000 mm × 2 700 mm

4）特殊专用液锻用液压机。特殊专用液锻用液压机主要是针对大型或小型大批量产品而专门设计的，考虑工艺的可操作性和制件的特殊要求，这是设备的结构除了保证有一般液压机的结构外，在许多地方具有专门的装置，以便实现特殊的要求。

① 浇注式液压机。由于金属浇注量大，为了便于浇注，将下模置于设备工作台外浇入金属液后再推入设备工作台中，完成施加压力，使液态金属成形。这类设备如前苏联的 J10437C 型单工位液压机，如图 6.5-11 所示。完成成形后，顶出制件，再推出工作台，以便下一次浇入金属液。

② 多工位式液压机。为了实现浇注、压制、顶出、清理和冷却等在不同的工作位置上完成，液压机经特殊设计可实现这种专门的功能。如 JI0638 三柱四工位转台式液压机就是典型的代表，其设备主要性能数据列于表 6.5-2。

③ 小型或薄壁件压机。对于小型或薄壁型液锻件，生产批量较大时，需专用设备，其工艺中一个重要因素是浇注至开始加压的时间控制，防止在加压前金属液在模具中过早凝固，这就需要设备应有较高的空程下行速度。图 6.5-12 为气动连杆式液态模锻压力机，用于小型液锻件生产，设备



主要性能参数为：公称压力 180 kN；滑块行程 150 mm；滑块与工作台面最大距离 180 mm；滑块滑动全行程时间 0.5 ~ 1 s。

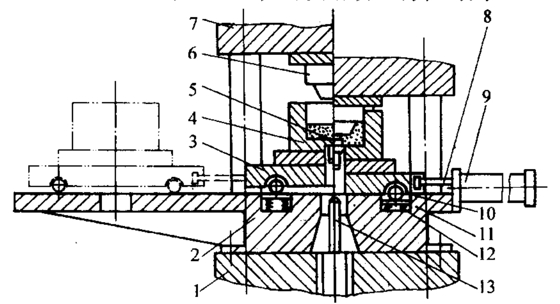


图 6.5-11 浇注式液压机示意图

1—工作台；2—底座；3—小车；4—凹模；5—底板；6—上模；7—上横梁；8—顶杆；9—侧缸；10—滚轮；11—活动板；12—弹簧；13—顶杆

表 6.5-2 两种大型液压机主要性能参数

型号	主缸压力/kN	下顶缸压力/kN	动横梁下行速度/$mm \cdot s^{-1}$	工作位数	备注
JI0437C	5 000	950	200	单工位	手动、半自动
JI0638	6 300	500	200	42 位	手动、半自动

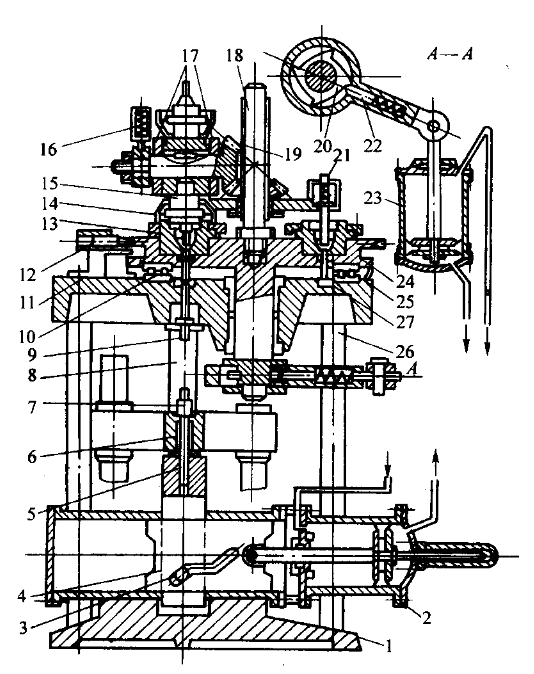


图 6.5-12 气动连杆式液锻压力机

1—机座；2、23—汽缸；3—带轴套的销子；4—水平动滑动；5—垂直动滑块；6—横臂；7—螺栓；8—立柱；9—下顶杆；10—滚动轴承；11—定位器支架；12、16—定位器；13—凹模；14—保护罩；15—冲头；17—垂直动横梁；18—花键轴；19—锥齿轮；20—棘轮；21—喷涂、清理嘴；22—销子；24—旋转工作台；25—底板；26—支柱；27—上顶杆

图 6.5-13 为另一种气动式多工位专用压力机，相对应的四对冲头 15 和凹模 13 是轮流使用的。在工作位时，其中一对凹模和冲头进行浇注、压制和脱模，其余三对进行清模，喷涂和冷却，然后依次施转换位工作，每小时可生产 180 ~ 200 个质量为 520 g 的制件。

5）全自动液态模锻液压机。图 6.5-14 为下注式定量浇注、压制成形机械手取件、清模等全自动式液压机，由日本日立机械工程公司和日本日立有限公司日立研究所于 1982 年

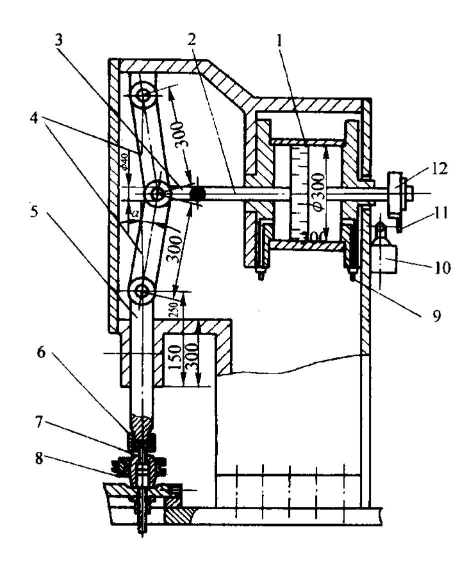


图 6.5-13 气动式多工位专用压力机

1—汽缸；2—活塞；3—搭板；4—连杆；5—滑块；6—连接螺母；7—冲头；8—制件；9—压缩空气管接头；10—限位开关；11—限位板；12—可调法兰盘

研制成功。铝液供给装置是采用气压装置，在密封的保温炉内，通入 0.03 ~ 0.11 MPa 压缩空气，使铝液口通过引液管 11，开液管 10 上升，当铝液触及金属面传感器 9 时，空气压送泵即行关闭，并打开空气排出阀，此时，加压活塞 3、4 上升，将定量的铝液推入模具内，并进行压制。残留在升液管和引液管内的铝液回流到保温炉内。待模压成形完成后，取出液锻件，清理模具，再重复上述的工作程序。这种工艺方法属于下注入式的间接液态模锻。

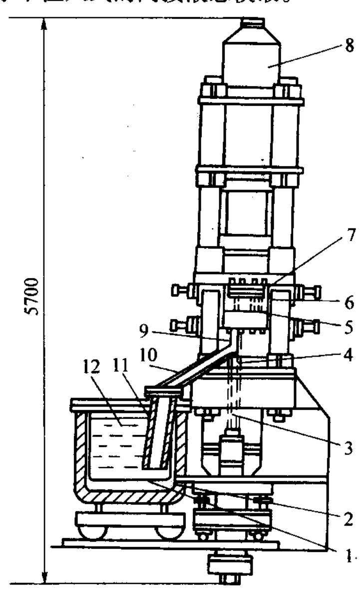


图 6.5-14 定量供液与压制自动压机

1—坩埚；2—铝合金保温炉；3—内活塞；4—外活塞；5—出气孔；6—模具；7—压板；8—合模液压缸；9—传感器；10—升液管；11—引液管；12—铝液

3.4 液态模锻辅助设备

液态模锻的辅助设备主要包括定量浇注和自动喷涂润滑剂的装置。

1）液态模锻定量浇注装置。对于液态模锻，浇入模具的金属液对制件成形的高度尺寸有影响，浇入金属液量越精确，制件高度尺寸偏差越小，因此，控制金属液浇入量成为

控制液锻件质量的关键环节，以下介绍几种定量浇注装置。

① 机械式浇勺定量浇注装置。如图 6.5-15 所示为机械式回转臂输送定量勺浇注装置，用以取代手工浇包或手工浇勺，不仅图 6.5-15 可以使金属液定量，而且还可以保证准确浇入和有相同的工作节奏，使液锻件质量得以保证。

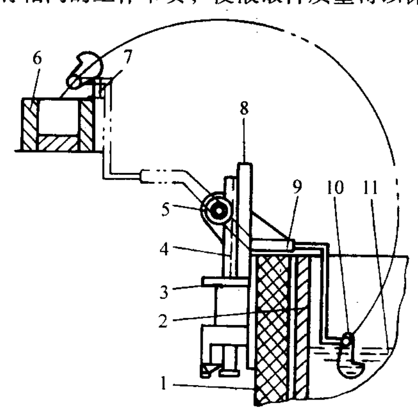


图 6.5-15 机械回转式定量浇勺装置

1—保温炉；2—炉衬；3—液压缸；4—齿条；5—齿轮；6—模具；7—挡块；8—支架；9—回转臂；10—定量勺；11—金属液

② 机械式活塞泵自动定量浇注装置。如图 6.5-16 所示为活塞泵自动定量浇注装置，它利用活塞的推出容积起到定量作用，使液态金属通过输液管进入模腔中。

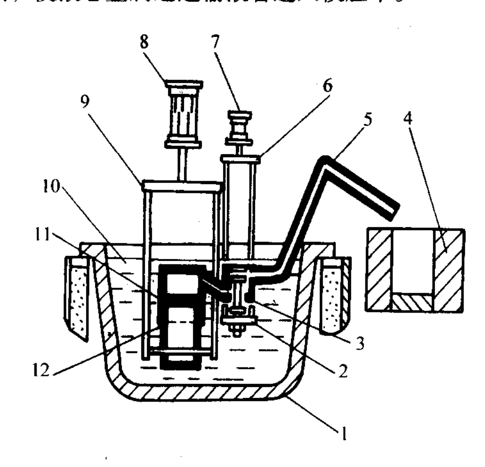


图 6.5-16 活塞泵自动浇注装置示意图

1—坩埚；2—阀杆；3—阀体；4—模具；5—输液管；6—操纵架；7、8—气缸；9—操纵架；10—金属液；11—活塞泵；12—活塞

③ 汽缸式自动定量浇注装置。图 6.5-17 所示为气压式自动定量装置，它利用压缩空气、氮气或惰性气体的压力，将一定量的液态金属注入到模腔中。

2）润滑剂喷涂装置。液态模锻在大批量生产时要考虑自动化的润滑剂喷涂设备，以减轻工人的劳动强度。模具自动喷涂装置一般有固定式和移动旋转式两种。

固定式喷嘴，是把喷嘴固定在模具上，在取出工件后自动喷涂涂料。移动旋转式喷嘴，是喷嘴安装在活动架上，或者使用机械手夹持喷嘴，当制件取出后活动架或机械手自动进入模具之间进行喷涂涂料。采用哪一种喷涂装置，应根据模具和工件大小，以及工艺的要求选择，其目的是使润滑剂喷涂均匀。固定式适用于小吨位压力机和小型简单的液锻件；移动旋转式适用于大吨位的压机和大而型腔复杂的模具。

这两种喷涂方式都是利用压缩空气和专用喷枪，将润滑剂喷于模具表面。

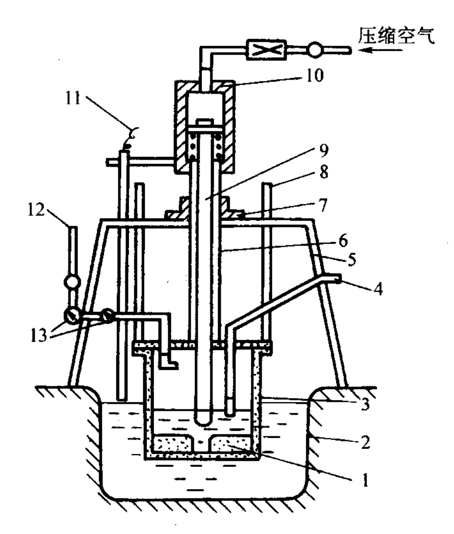


图 6.5-17 气压式自动定量浇注装置

1—石墨嘴；2—保温炉；3—内坩埚；4—供液管；5—框架；6—螺旋管；7—链轮；8—导管；9—塞杆；10—固定汽缸；11—液面探头；12—进气管；13—减压阀

4 液态模锻工艺方法分类

液态模锻按施加压力的方式和金属流动充型方式，可分为直接加压、间接加压和间接挤注三类。

4.1 直接加压法（直接液态模锻）

直接加压法液态模锻属于整体加压液态模锻成形方法，一般有两种形式。

1）平冲头上直接加压。当金属液浇入凹模后，平底冲头与凹模形成封闭的型腔，并直接加载到金属液上，很快建立起压力，使锻件成形，如图 6.5-18 所示。

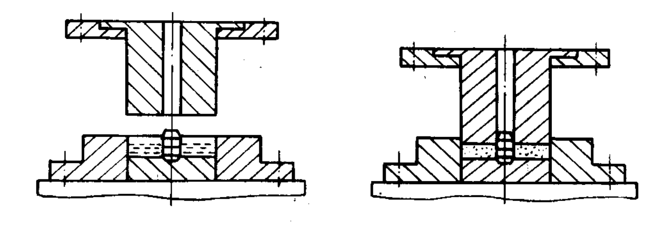


图 6.5-18 平冲头上直接加压示意图

2）异形冲头直接加压。当金属液浇入凹模后，异形冲头与凹模形成封闭的型腔，在冲头的下行过程中先封闭型腔，并使金属液流动充满型腔，使锻件成形，如图6.5-19 所示。

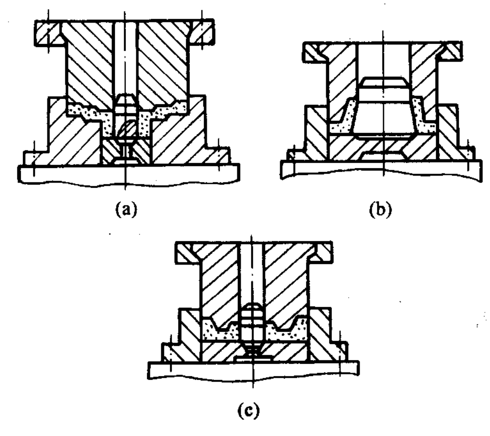


图 6.5-19 异形冲头直接加压示意图

4.2 间接加压法

间接加压法（间接液态模锻）属于局部加压方法，是将金属液浇入凹模或储液腔后，上模先闭合锁定形成整体型腔，然后通过上冲头挤入金属液，使金属反挤流动充满型腔，完成锻件成形；或下柱塞将金属液挤入型腔，使金属液正挤流动充满型腔，使之在压力下凝固成形，如图 6.5-20 所示。

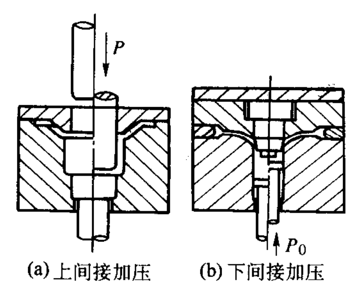


图 6.5-20 间接加压法示意图

4.3 间接挤注法

间接挤注法是指将浇入到储液腔内的金属液，利用上柱塞或下柱塞，通过浇道挤入到封闭的型腔中，获得所需要的锻件，如图 6.5-21 所示。这种成形方法压力损失较大，因此，要求浇道的截面积要大且短，而多余的金属留在储液腔中，出模后与锻件分离。

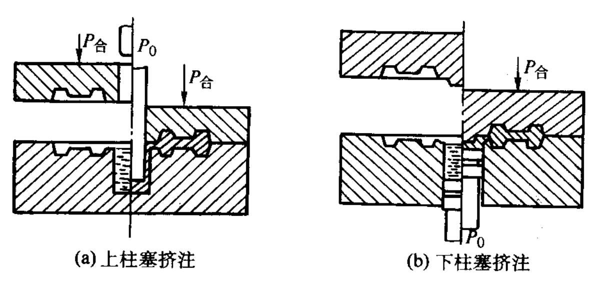


图 6.5-21 间接挤注法示意图

5 液态模锻锻件分类与设计要点

5.1 液锻件分类

1）盘类件。盘类件多为高度小于横向尺寸，有浅内腔和无通孔的实心件，如图 6.5-22 所示：这类锻件适合采用异性冲头加压成形。

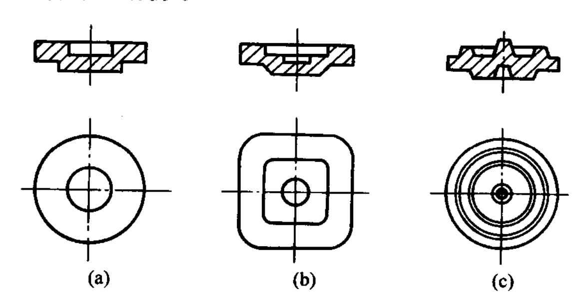


图 6.5-22 典型盘型液锻件示意图

2）轴对称实心件。这类制件是指各种实心的原截面、方截面坯，如图 6.5-23 所示。这类锻件适合采用平冲头加压成形。

3）杯类件。这类制件是有一定深度、中空有底、有一定壁厚的轴对称锻件，如图 6.5-24 所示，这类锻件需采用凸式冲头直接加压成形。

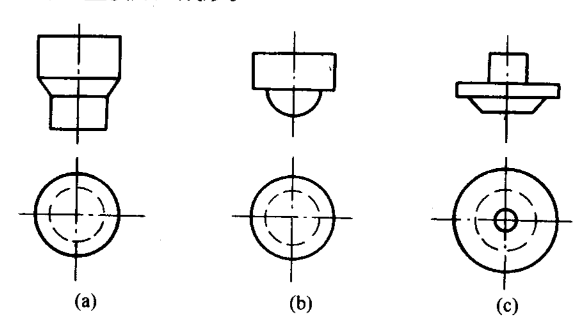


图 6.5-23 典型实心液锻件示意图

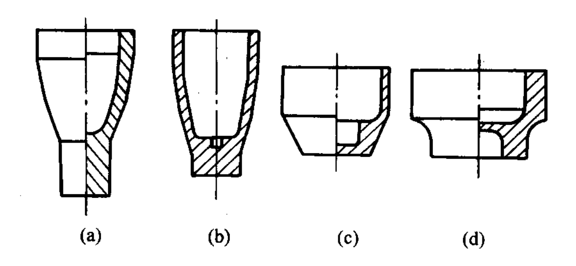


图 6.5-24 典型杯形液锻件示意图

4）法兰盘类。法兰盘类零件根据法兰盘的个数和所处的位置不同，可选择合适的分模方式和不同的模具结构，如图 6.5-25 所示，一般只成形出盲孔。

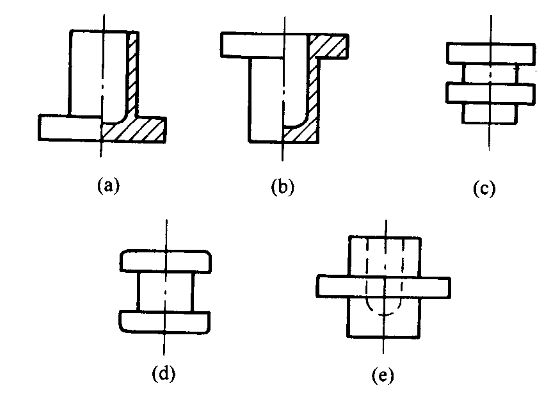


图 6.5-25 法兰盘类锻件示意图

5）长轴类件。如图 6.5-26 所示，这类锻件是指轴线方向尺寸远大于横向尺寸，这类液锻件成形时根据受压端面的形状设计凸模，其加压方向与锻件主轴线方向垂直。

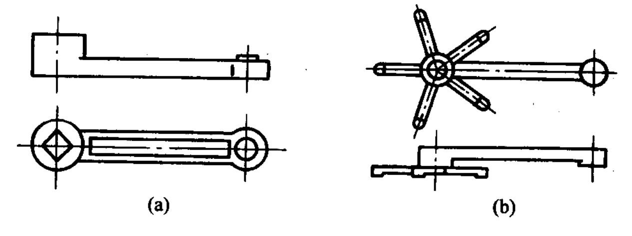
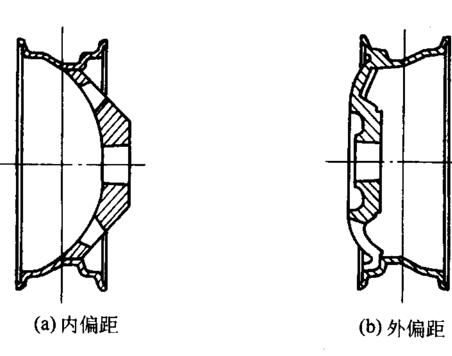


图 6.5-26 长轴类锻件示意图

6）轮辐式侧凹类件。汽车轮圈、摩托车轮圈及坦克轮圈均属于这类，如图 6.5-27 所示。这类轮圈具有较高的复杂程度，有的轮薄而高，有的直径大。液态金属的流动距离较远，大都采用间接式液态模锻成形方法。

7）叶轮及羿片类件。整体叶轮、单体导向羿片、导向舵面等属于这类锻件，如图 6.5-28 所示，这类锻件的轮叶、羿片需采用间接液态模锻方法成形。



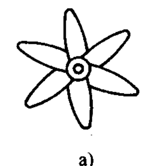


(a) 内偏距　　(b) 外偏距

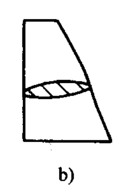
图 6.5-27　轮辐式侧凹类锻件示意图

8）复合类件。由上述类型二个以上特征的锻件或不属于上述类型的锻件归于此类，如图 6.5-29 所示。

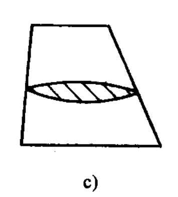
此类液锻件结构复杂，有的需要抽芯或成形后将组合凹



a)



b)



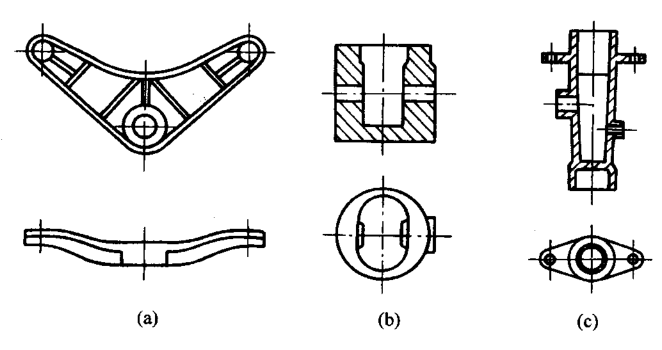
c)

图 6.5-28　叶轮及羿片类锻件示意图

模分型取件等，可采用直接加压成形，也可采用间接加压成形。

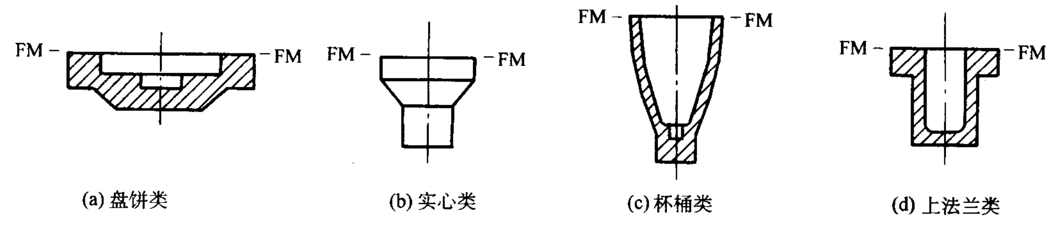
5.2　成形方案与分模位置

1）对于盘饼类、实心类和液锻件，若外形没有局部侧凹或侧凸形状时，锻件可直接加压成形，成形后可沿型腔直接顶出取件，则在取分型位置时基本相同，如图 6.5-30 所示。



(a)　　(b)　　(c)

图 6.5-29　复合类液锻件示意图



(a) 盘饼类　　(b) 实心类　　(c) 杯桶类　　(d) 上法兰类

图 6.5-30　直接加压简单分模示意图

2）对双法兰类、下法兰类等可采用直接加压成形的液锻件，由于有侧凹和锻件脱模的要求等，其采用先分型再取出制件，则分型采用了轴向对称分型，如图 6.5-31 所示。

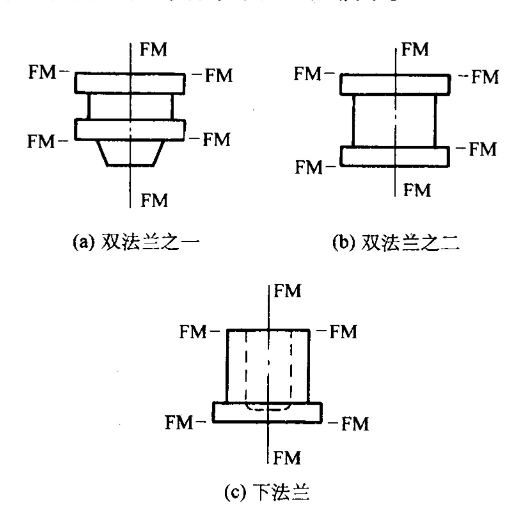
3）对于轮辐类、整体蜗轮类等外形有侧凹或羿片类液锻件，一般采用间接式液态模锻成形方法，锻件成形后，需将模具的凹模分型后才能取出锻件，因此，这类锻件的分模也较复杂，如图 6.5-32 所示。

4）对于有侧凸和侧孔的液锻件，采用直接加压或间接加压成形后，通过抽芯和分型后锻件才能出模，这类锻件的开模方向和抽芯方向相互垂直，如图 6.5-33 所示。

5.3　加工余量与锻件公差

在液锻件设计时除了在零件上要求可以保留的净锻表面，即可不进行加工的表面，是不考虑加工余量的。其他凡有加工要求的表面，根据加工表面的粗糙度要求，与用户商谈确定，保证有足够的余量，以便在机械加工时达到产品的尺寸精度要求。

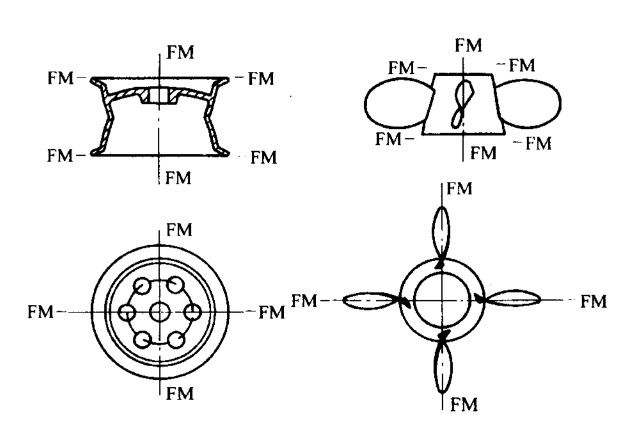
在液态模锻时，由于模具尺寸、模具的结构形式、成形加压方式、材料的收缩率等影响，液锻件的尺寸稳定性各有不同，可分为以下三类。如图 6.5-34 所示。



(a) 双法兰之一　　(b) 双法兰之二

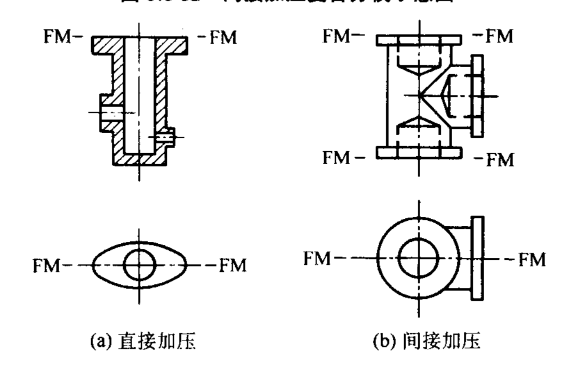
(c) 下法兰

图 6.5-31　直接加压复合分模示意图



(a) 轮辐类 (b) 叶轮类

图 6.5-32 间接加压复合分模示意图



(a) 直接加压 (b) 间接加压

图 6.5-33 带有抽芯的对半分模示意图

第一类：静态尺寸，用J表示，液锻件的尺寸在模具内不受分型面和活动部分的影响，它只受模具加工精度、合金收缩率和脱模温度影响，如图6.5-34中J类尺寸。

第二类：动态尺寸，用D表示，液锻件的尺寸在模具内受模具分型面和其他活动部分的影响，常引起尺寸增大，如图6.5-34D尺寸。

第三类：定量相关尺寸，用L表示，液锻件的尺寸在模具内受合金注入量的影响，可能增大，也可能减小，其尺寸由浇入的合金量决定，如图6.5-34L尺寸。

液锻件的尺寸精度还没有统一的标准，一般参考锻件和铸件的相关标准，由企业与用户商量解决。此处表6.5-3～表6.5-7是推荐的液锻件尺寸精度及位置精度，仅供参考。

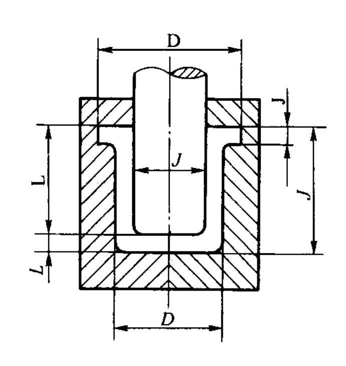


图 6.5-34 液锻件尺寸分类示意图

当产品的外观表面和尺寸精度要求较高时，需在加工表面留出足够的加工余量，以便机械加工来达到产品的表面及尺寸精度要求。

表 6.5-3 配合尺寸的精度

<table>
<tr><th rowspan="2">基本尺寸/mm</th><th colspan="3">锌合金</th><th colspan="3">铝合金</th><th colspan="3">镁合金</th><th colspan="3">铜合金</th></tr>
<tr><th>J</th><th>D</th><th>L</th><th>J</th><th>D</th><th>L</th><th>J</th><th>D</th><th>L</th><th>J</th><th>D</th><th>L</th></tr>
<tr><td>1～3</td><td rowspan="2">0.1</td><td rowspan="6">IT12</td><td rowspan="6">IT15</td><td rowspan="6">IT12</td><td rowspan="6">IT13</td><td rowspan="6">IT16</td><td>0.1</td><td rowspan="4">IT12</td><td rowspan="6">IT15</td><td rowspan="6">IT13</td><td rowspan="6">IT14</td><td rowspan="6">IT16</td></tr>
<tr><td>>3～6</td><td rowspan="2">IT11</td></tr>
<tr><td>>6～10</td><td>IT11</td></tr>
<tr><td>>10～18</td><td>IT11</td><td rowspan="3">IT12</td></tr>
<tr><td>>18～30</td><td>IT11</td><td rowspan="2">IT13</td></tr>
<tr><td>>30</td><td>IT12</td></tr>
</table>

表 6.5-4 非配合尺寸公差 mm

基本尺寸	公差											
	锌合金			铝合金			镁合金			铜合金		
	J	D	L	J	D	L	J	D	L	J	D	L
≤10	±0.1	±0.16	±1.0	±0.12	±0.20	±1.0	±0.12	±0.20	±1.0	±0.20	±0.30	±1.0
>10～18	±0.12	±0.20	±1.0	±0.16	±0.25	±1.0	±0.16	±0.30	±1.0	±0.25	±0.35	±1.0
>18～30	±0.15	±0.25	±1.0	±0.20	±0.30	±1.0	±0.20	±0.30	±1.0	±0.30	±0.40	±1.0
>30～50	±0.20	±0.30	±1.0	±0.20	±0.30	±1.0	±0.20	±0.35	±1.0	±0.30	±0.45	±1.0
>50～80	±0.20	±0.35	±1.0	±0.25	±0.40	±1.0	±0.25	±0.40	±1.0	±0.35	±0.50	±1.0
>80～120	±0.25	±0.40	±1.0	±0.30	±0.50	±1.0	±0.30	±0.50	±1.0	±0.40	±0.60	±1.0
>120～180	±0.30	±0.50	±1.5	±0.40	±0.60	±1.5	±0.40	±0.60	±1.5	±0.50	±0.70	±1.5
>180～260	±0.40	±0.60	±1.5	±0.50	±0.70	±1.5	±0.50	±0.70	±1.5	±0.60	±0.80	±1.5
>260～360	±0.50	±0.70	±1.5	±0.60	±0.80	±1.5	±0.60	±0.80	±1.5			
>360～500	±0.65	±0.85	±2.0	±0.70	±0.90	±2.0	±0.70	±0.90	±2.0			
>500～630	±0.80	±1.0	±2.0									



表 6.5-5　孔中心距尺寸的公差

mm

孔中心距基本尺寸	一般		最小	
	J	D	J	D
≤18	±0.10	±0.15	±0.08	±0.10
>18~30	±0.10	±0.20	±0.10	±0.15
>30~50	±0.15	±0.25	±0.12	±0.20
>50~80	±0.20	±0.30	±0.17	±0.25
>80~120	±0.30	±0.40	±0.23	±0.30
>120~180	±0.45	±0.50	±0.30	±0.40
>180~260	±0.60	±0.70	±0.45	±0.55
>260~360	±0.75	±0.90	±0.55	±0.70

表 6.5-6　液锻件的平行度允差

mm

基本尺寸	<50	50~100	100~300	300~600	>600
机械加工后标准	±0.02	±0.04	±0.06	±0.08	±0.10
敲平后标准	±0.06	±0.10	±0.20	±0.40	±0.60
液锻件允许标准	±0.20	±0.40	±0.60	±0.80	±1.0

表 6.5-7　液锻件的不平行度允差

mm

基本尺寸（长×宽）	允许不平度		
	机械加工后标准	敲平后标准	液锻件允许标准
<10×10			±0.05
<30×30			±0.10
<50×50	±0.02	±0.06	±0.12
<100×100	±0.04	±0.10	±0.20
<200×200	±0.06	±0.20	±0.40
<400×400	±0.08	±0.40	±0.80
<600×600	±0.10	±0.60	±1.0

液锻件加工余量的选择原则如下。

1）尽可能将加工余量减到最低，对于静态尺寸在不需要加工要求的情况下，不加放余量。

2）尽可能避免在液锻件厚度上进行两面加工，如果需要时，双面可以考虑加放适当余量。

3）对于结构较薄的地方，可以采用大余量，成形后通过机加工保证原设计尺寸。

4）一般尽可能采用小余量，以便体现毛坯精化的效果。设计时可以参考表 6.5-8，选取余量。

表 6.5-8　各种合金液锻件的加工余量

mm

基本尺寸	铅合金锡合金	锌合金	铝合金	镁合金	铜合金
<100	0.1~0.3	0.1~0.4	0.1~0.4	0.1~0.4	0.3~0.5
100~200	0.2~0.3	0.2~0.5	0.2~0.6	0.2~0.6	0.5~0.7
>200	0.3~0.5	0.5~0.7	0.5~0.8	0.5~0.8	0.7~1.0

5.4　脱模斜度

为便于成形后的液锻件顺利脱模，在锻件出模方向的模具侧壁上应有一定的斜度，这个斜度在锻件上的斜度称为脱模斜度。脱模斜度的作用如下。

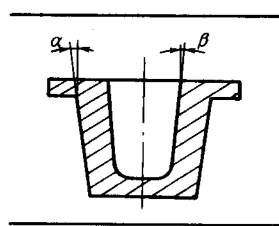
1）易于使液锻件脱模，出模顺利，出模力小。

2）可避免液锻件表面划伤，保证表面质量。

3）防止金属与模具粘连，保证模具正常使用。

根据锻件的脱模部位不同，分为内脱模斜度和外脱模斜度，如表 6.5-9 所示，并参考选用。设计时应充分利用锻件的外形。

表 6.5-9　液锻件常用脱模斜度

简图	斜度类型	最小斜度值				
		铝合金	镁合金	锌合金	铅锡合金	铜合金
	外斜度 α	30′	15′	0°	0°	1°
	内斜度 β	1°	30′	15′	15′	1°



5.5 圆角半径

液锻件上面与面转接处，除在分模位置上允许有直角外，均需考虑采用一定的圆角连接。液锻时的圆角半径可起到以下作用。

1）有利于液态合金在模腔内流动，避免产生涡流，从而改善液锻件的组织。

2）避免液锻件凹角处的应力集中，使模具开裂。

3）避免液锻件凹角处在热处理时造成应力开裂。

4）有利于锻件脱模，减少模具磨损。

液锻件的圆角半径应适当选择，圆角过大易产生缩孔、缩松等，过小时易产生裂纹等。对于不等壁厚的液锻件，如图6.5-35所示，圆角半径可按：

$$R=(A+B)/4,\ r=0.4R$$

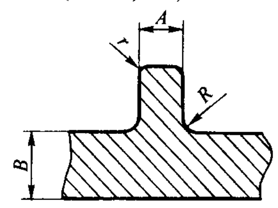


图6.5-35 不等壁厚时的圆角

对于等壁厚相联的液锻件，如图6.5-36所示，其圆角半径按：

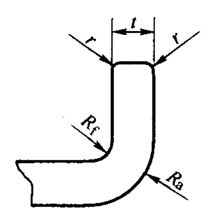


图6.5-36 等壁厚时的圆角

$$R_{f\min}=t/2,\ R_{f\max}=t;\ R_a\leqslant R_f+t,\ r=0.4R_f$$

上述公式只适于壁厚小于6 mm的情况。

5.6 液锻件的收缩率

由于液锻时，液态金属在压力的作用下其外形尺寸受模具约束，靠模具保证，但液锻件出模温度较高，冷到室温后的尺寸变化较大，因此，在模具设计时，就应根据不同的金属冷却收缩的规律，合理计算确定型腔尺寸，以保证液锻件冷却收缩后达到设计的要求。

一般来说，液锻件的实际收缩除了与其材料本身的物理性质决定的，但锻件结构特点、液锻时的加压方式以及工艺因素等，都会对液锻件的收缩产生影响，所以在实际设计时，首先按合金的常用收缩进行初步计算，然后经过试模修整达到理想结果。

表6.5-10给出了部分常用合金的线收缩率。表中所给线收缩率的范围较大，选用时，对于薄壁、工艺压力较大，模具有冷却装置，结构复杂的液锻件，可取小值，其余取大值。

表6.5-10 常用合金的线收缩率 ε_1

合金牌号	ε_1/%	合金牌号	ε_1/%
ZL101	0.36～0.6	ZM1	0.43～0.65
ZL102	0.3～0.5	ZM2	0.43～0.65
ZL103	0.43～0.67	ZM3	0.42～0.67
ZL104	0.33～0.55	ZM5	0.37～0.65
ZL105	0.38～0.6	ZQSn	0.47～0.8
ZL201	0.42～0.65	ZQPb	0.47～0.8
ZL202	0.42～0.67	ZQAl	0.6～0.9
ZL203	0.45～0.72	ZH62	0.59～0.88
ZL301	0.43～0.67	ZHSi	0.53～0.85
ZL302	0.42～0.65	ZHPb	0.74～1.1
ZL401	0.4～0.7	ZHAl	0.42～0.9
钢	0.73～1.23	ZHMn	0.3～0.7
铸铁	0.35～0.95	ZHFe	0.74～1.1

5.7 液锻件图设计

液锻件图设计的依据是零件图（产品图）和所选择的液锻成形方式。液锻件图分为检验用锻件图（冷锻件图）和制模用锻件图（热锻件图）。

1）检验用锻件图（冷锻件图）设计。在锻件结构设计要求的基础上，根据零件图结构，在确定了液锻加压方式后，可着手设计锻件图，锻件图设计应注意以下规定。

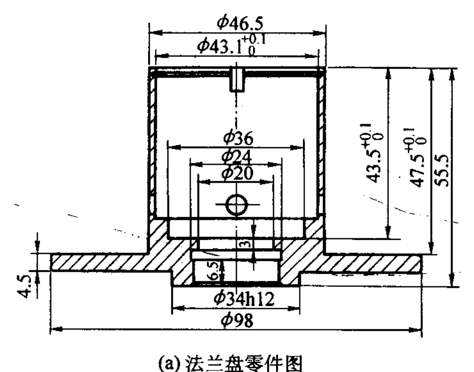
① 液锻件主视图应与液锻时的位置相一致。

② 对于不锻出的孔或部分简化后的轮廓应填实（余料）处理。

③ 尺寸标注尽可能与零件图一致，并标注锻件公差，在尺寸线下方用括号标出零件的公称尺寸。

④ 在加放余量和余料处理的锻件图中，用双点划线绘出零件的外轮廓。

⑤ 凡在锻件图中无法用数字、符号表示的有关质量要求，应用文字列入到技术条件中用文字加以说明。如热处理要求，表面清理方法，允许的表面缺陷，锻件的形状位置公差、未注的圆角半径和斜度等。如图6.5-37所示。



(a) 法兰盘零件图　(b) 法兰盘锻件图

图6.5-37 法兰盘零件及锻件示意图

2）制模用锻件图（热锻件图）设计。制模用锻件图也称热锻件图。其设计依据是在冷锻件图的基础上，考虑锻件成形后的收缩，在相应尺寸上加放收缩值，其设计原则如下。

① 考虑修模余地和磨损的影响，对型腔部分尺寸，应以液锻件基本尺寸最小值取正偏差，相应于型芯部分尺寸，应以液锻件内孔基本尺寸的最大值取负偏差。

② 对于锥型部分的尺寸，型腔部分的尺寸以大头尺寸为基础，型芯部分的尺寸以小头尺寸为基准。

根据上述原则，各尺寸可按以下公式计算

型腔部分尺寸计算公式为：

$$L' = (L + \Delta/2 + L\varepsilon_1 - T)^{+T}$$

式中，L'为制模用液锻件图基本尺寸；L为液锻件最小极限尺寸；Δ为液锻件公差（见表3-8～3-10）；ε_1为液锻合金的线收缩率；T为模具制造公差，（$T = (1/5 \sim 1/3)\Delta$）。

型芯部分的尺寸计算公式为：

$$D' = (D - \Delta/2 + D\varepsilon_1 + T)_{-T}$$

式中，D'为制模用液锻件图的基本尺寸；D为液锻件的最大极限尺寸；

孔中心距尺寸计算公式为：

$$S' = (S + S\varepsilon_1) \pm T$$

式中，S'为制模用液锻件图孔中心距尺寸；S为液锻件空中心距的基本尺寸。

③ 图中应指明分型面位置，型腔高度尺寸应以分型面为基准标出，便于型腔分开加工及制造电极和样板。

④ 将制模用锻件图绘制在模具总装图的右上角处。

⑤ 应列出制模时的技术条件，如未注脱模斜度、圆角半径等。

6　液态模锻模具结构设计

液锻模具设计属于非标准设计，设计灵活性大，有一定的难度，主要是与经验有直接关系，由于成形对象是液态金属，因此，在设计时选择合理结构与使用安全非常重要。

6.1　液锻模具设计的基本要求

1）液锻模具应根据液锻件的类型特征，选择合适的结构，保证液锻件成形尺寸和技术要求。

2）在保证锻件质量和安全生产的前提下，模具结构应力应简单、合理，易于制造，便于使用和维护。

3）模具各零件选材适当，并通过合适的机加工工艺和热处理工艺保证各零件的结构尺寸和使用强度、刚度要求。

4）模具应有合理的脱模机构，以保证液锻件的顺利脱模。

5）批量生产时，应将模座设计为通用型，并将凹模或凸模设计成可更换型，以缩短设计和制造周期，保证生产的连续性，液锻模具易于实现多品种、多规格。

6.2　液锻模具设计步骤

在了解了液锻模具设计的基本要求的前提后，便可着手设计液锻模具，设计步骤如下。

1）分析零件结构，选择合适的成形方案和加压方式，确定液锻件的分模位置。

2）设计绘制液锻检验用锻件图和制模用锻件图。

3）对模具结构进行初步分析，确定模具结构的总体布置方案：凹凸模结构及固定方式、模具配合间隙，顶件方式及结构，排气道和溢料槽（如需考虑时），模具的加热与冷却方式，模具材料及加工要求等。

4）进行有关计算

① 凸模（型芯）、凹模（型腔）尺寸计算。

② 选择比压值大小，计算校核模具结构强度及刚度，选择成形设备吨位。

③ 确定模具合模时的闭合高度，模具开启后锻件可顶出取件，及浇入金属液的空间高度。

④ 计算抽芯力，选择抽芯方式，设计抽芯机构。

⑤ 计算所需顶杆长度，以保证液锻件顺利脱模。

5）绘制液锻模具总装图，主视图应取正面剖视图，能清晰地反映出凹模、凸模及模具其他结构，以便直观表达出模具工作原理和结构关系，还可以辅助其他视图，将模具结构表达完整。

6）绘出模具中的各零件配合关系和其他技术要求。

7）确定模具各零件的材料及给出热处理要求。

8）列出模具零件明细表和标准件清单。

9）绘制各零件图（标准件除外）。

6.3　模具结构分类

液锻模具的分类方式有多种，由于液态模锻的成形方案中，加压方式不同，液锻件结构类型不同，液锻件成形后的出模方式不同，液态模锻模具还有按结构功能类型分类，但多数以凹模结构形式分类。

1）整体式凹模（简单模）。对于无侧凹、侧凸和侧抽芯的液锻件，一般凹模为整体式结构，其形状由液锻件外形和分模位置所决定，其加工制造相对简单，其典型结构如图6.5-38所示。

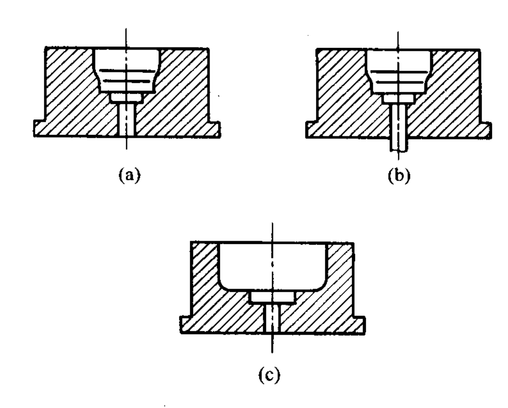


图6.5-38　整体式凹模结构示意图

2）组合凹模式（可分模）。对于液锻件带有侧凹、侧凸时，在成形完成后，只有将液锻凹模侧向分开才能顺利取出液锻件，因此，液锻凹模则应按照液锻件的结构和分模位置要求进行部分组合，以保证液锻件的外形尺寸，并便于液锻件脱模，图6.5-39给出了典型的组合凹模的结构。

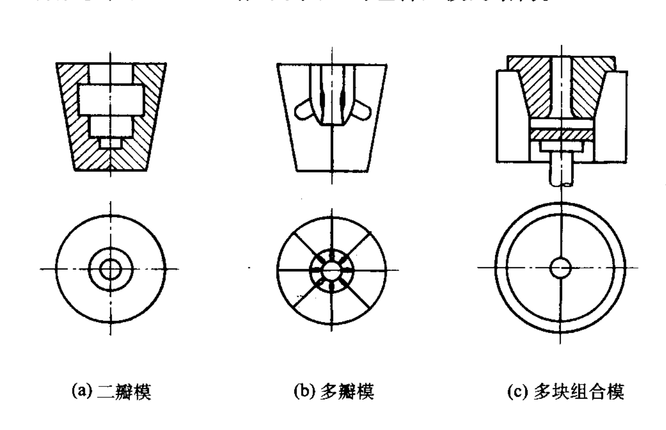
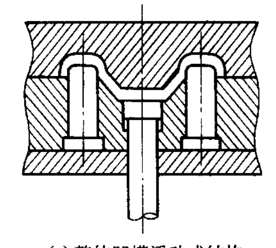


图6.5-39　组合凹模结构示意图

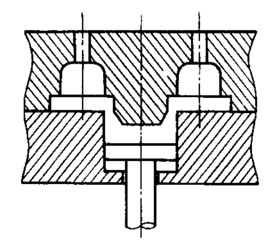


3）多型腔凹模。多型腔凹模一般为间接式挤注液态模锻加压方式，金属液先浇入到储液室内，模具闭合后，再利用活塞将金属液通过浇道同时挤入到闭合的模具各型腔中，因此，凹模在同一模板上为对称排布，为了使液锻件在成形时获得较高的压力，型腔与储液室相连接的浇道尽可能短，必要时，型腔与储液室应有搭接部分。如图 6.5-40 所示。

4）浮动式凹模。这类模具在对浇注量设有严格限制时，通过浮动模具的型腔容积的实际调控来实现，即保证了制件的总体结构尺寸，又可以避免对浇注量的严格控制，为批量生产提供了方便。如图 6.5-41 所示。

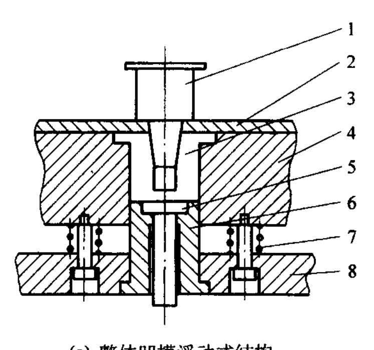


(a) 整体凹模浮动式结构

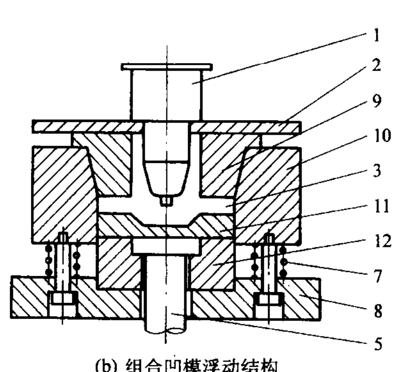


(b) 组合凹模浮动结构

图 6.5-40　多型腔凹模示意图



(a) 整体凹模浮动式结构



(b) 组合凹模浮动结构

图 6.5-41　浮动式凹模示意图

1—凸模；2—卸料板；3—液锻件；4—整体凹模；5—顶杆；6—导向块；7—弹簧；8—下模座；9—半凹模；10—浮动模套；11—活动凹模底板；12—导向托板

6.4　凹模与凹模套设计

（1）凹模的壁厚及底板厚度

凹模因承受合模时的压力、液锻时的压力、挤压力和脱模力等，这四种力中，合模力多数为轴向压力，液锻力和挤压力会使凹模型腔内壁受压应力，则造成凹模侧壁产生切向拉应力，因此。凹模应有足够的壁厚，以防止切向拉应力使凹模胀裂或变形。凹模侧壁厚度和底板厚度的计算就显得非常重要。脱模力一般与变形压力相反，主要是连接螺栓的强度设计应能满足这一需要即可。液锻时，凹模的变形或破坏都会使液锻工件失败。在计算凹模壁厚时，应分别从强度条件和刚度条件来计算，互相校核。

对于圆形液锻凹模进行强度校核时，可用材料力学中壁厚圆筒的强度校核公式进行计算。

对于圆形液锻凹模进行刚度校核时，可根据广义虎克定律，在弹性范围内进行校核计算。

对于其他形式的凹模，均可按表 6.5-11 中的公式进行计算。

表 6.5-11　凹模侧壁及底板厚度计算公式

类型	图例	按刚度计算	按强度计算
整体式圆形凹模		$t_1 = r\sqrt{\dfrac{1-\mu+\dfrac{E\delta}{rp}}{\dfrac{E\delta}{rp}-\mu-1}}-1$	$t_1 = r\left(\sqrt{\dfrac{\sigma_p}{\sigma_p-2p}}-1\right)$
		$t_2 = \sqrt[3]{0.141\dfrac{pr^4}{E\delta}}$	$t_2 = \sqrt{\dfrac{3pr^2}{4\sigma_p}}$
垫板式圆形凹模		$t_1 = r\sqrt{\dfrac{1-\mu+\dfrac{E\delta}{rp}}{\dfrac{E\delta}{rp}-\mu-1}}-1$	$t_1 = r\left(\sqrt{\dfrac{\sigma_p}{\sigma_p-2p}}-1\right)$
		$t_2 = \sqrt[3]{0.59\dfrac{pr^4}{E\delta}}$	$t_2 = \sqrt{\dfrac{1.22pr^2}{\sigma_p}}$

续表 6.5-11

类型	图例	按刚度计算	按强度计算
整体式矩形凹模		$t_1=\sqrt[3]{\dfrac{Cpa^4}{E\delta}}$	$t_1=\sqrt{\dfrac{6M_{max}}{\sigma_p}}$
		$t_2=\sqrt[3]{\dfrac{Cpa^4}{E\delta}}$	$t_2=\sqrt{\dfrac{6M_{max}}{\sigma_p}}$
垫板式矩形凹模		$t_1=\sqrt[3]{\dfrac{paL^4}{32Eb\delta}}$	$t_1=\sqrt{\dfrac{paL^2}{2b\sigma_p}}$
		$t_2=\sqrt[3]{\dfrac{5pB_1L_1^4}{32EB\delta}}$	$t_2=\sqrt{\dfrac{3pB_1L_1^2}{4B\sigma_p}}$

表中，t_1 为侧壁厚度，mm；t_2 为底板厚度，mm；p 为液锻比压力，MPa；E 为弹性模量：钢 2.1×10^5，MPa；R 为型腔内半径，mm；μ 为泊桑系数；σ_p 为材料许用拉应力，MPa；δ 为允许变形量，mm；L 为型腔侧壁长度，mm；L_1 为底板受压长度，mm；B 为凹模高度，mm；A 为型腔深度，mm；B 为凹模宽度，mm；B_1 为型腔宽度，mm；C 为有关的常数，见表 6.5-12；M 为弯曲力矩，N·mm。

应用表中公式计算时，允许变形量 δ 是考虑模具变形对凸凹模间隙的影响。δ 太大，将会使间隙增大而使合金液从间隙中飞溅，故变形量 δ 控制在 0.05～0.10 范围内。在模具设计时凹模侧壁及底板的厚度，也可按表 6.5-13 及表 6.5-14 所列的经验数据选取。

表 6.5-12 常数 C 值

L/a	C	L/a	C
1.0	0.044	1.5	0.084
1.1	0.053	1.6	0.090
1.2	0.062	1.7	0.096
1.3	0.070	1.8	0.102
1.4	0.078	1.9	0.106

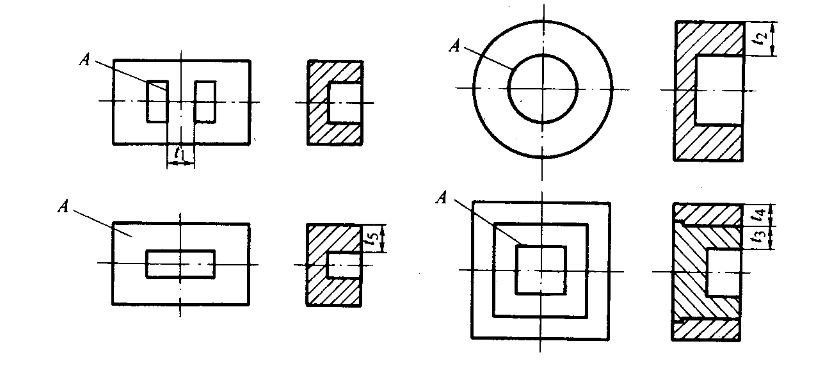
续表 6.5-12

L/a	C	L/a	C
2.0	0.111	4.0	0.140
3.0	0.134	5.0	0.142

表 6.5-13 凹模型板厚度

投影面积 A_0 /cm²	垫板厚度 t /mm	投影面积 A_0 /cm²	垫板厚度 t /mm
≤5	<5	>50～100	25～30
>5～10	15～20	>100～200	30～40
>10～50	20～25	>200	>40

表 6.5-14 凹模壁厚尺寸



续表 6.5-14

型腔壁部投影面积 A_0 /cm²	壁厚/mm				
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
<5	15~20	30~40	≤10	15~20	30~40
>5~10	20~25	40~50	10~15	20~25	40~55
>10~50	25~30	50~60	15~20	25~30	55~65
>50~100	30~35	60~75	20~25	30~40	65~70
>100~200	35~40	75~85	25~30	40~50	70~75
>200	>40	>85	30~35	50~60	>80

(2) 凹模套设计

对于成形后分开凹模才能取件的组合式凹模，必须在有凹模套的情况下才能正常使用，凹模套起着使组合凹模形成整体，并承受径向压力的作用，以保证在液锻时组合凹模形成完整的型腔。

凹模套与组合凹模的配合多数采用锥度配合，也有直壁式配合，这需要根据液锻件的形状结构要求选择，主要考虑成形后，组合凹模与制件能顺利地从凹模套中顶出。如图6.5-42、6.5-43所示。

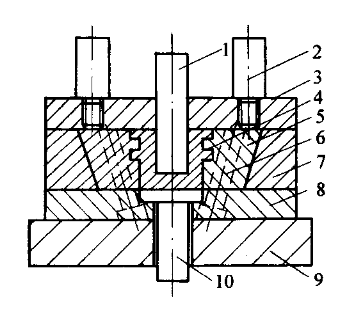


图 6.5-42 间接挤压凹模与模套

1—凸模；2—压杆；3—上凹模板；4—液锻件；5—可分凹模；6—斜销；7—模套；8—垫板；9—下模板；10—推杆

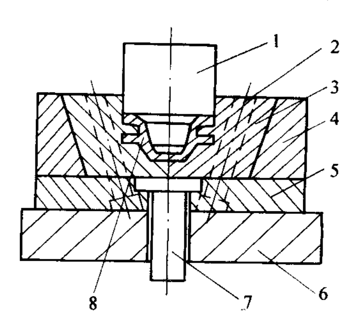


图 6.5-43 直接加压凹模与模套

1—凸模；2—斜销；3—可分凹模；4—模套；5—斜销固定板；6—下模板；7—推杆；8—液锻件

凹模套结构设计主要是壁厚的确定，壁厚的计算，可以参考整体式凹模壁厚的计算方法。

(3) 凹模型腔及导入部分尺寸

对于直接挤压式加压方法成形时。因为防止液态金属飞溅以及因为合金在液锻过程中要发生收缩塑性变形，高度下降，凹模型腔的高度等于制模用液锻件图上相应尺寸加导入深度（H）见表6.5-15所示，再加总压下量（h）。如图6.5-44所示。

总压下量 h 按公式计算

$$h = h_1 + h_2 + h_3 = [\varepsilon + (1-\varepsilon)\varepsilon_1]\ V_{液}/A_0$$

式中，h_1 为初始加压阶段，mm；h_2 为压力结晶阶段，mm；h_3 为塑性变形阶段，mm；ε 为合金液的体收缩率；ε_1 为合金液的线收缩率；$V_{液}$ 为合金液体积，mm³；A_0 为受压面积（投影面积），mm²。

表 6.5-15 导入深度 *H*

配合处投影面积 A_0/cm²	<5	>5~10	>10~50	>50~100	>100~200	>200
导入深度 H/mm	10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35

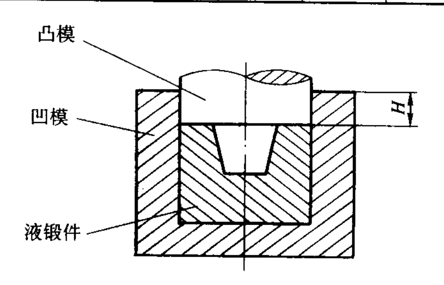


图 6.5-44 凹模型腔及导入部分尺寸

6.5 凸模与挤压头设计

液锻模具设计中，凸模或挤压头起到直接或间接对液态金属施加压力的作用，在成形后还要经受从锻件中抽出的抽拔力的作用，因此，除其尺寸和形状与锻件的端面有关外，在长度和安装结构上也要求简单、易加工、易装配和易更换。

一般有两种结构，对于小尺寸液锻用凸模，可以采用整体形式，如图6.5-45a所示，但大多数采用组合式凸模或挤压头，如图6.5-45b、c所示。

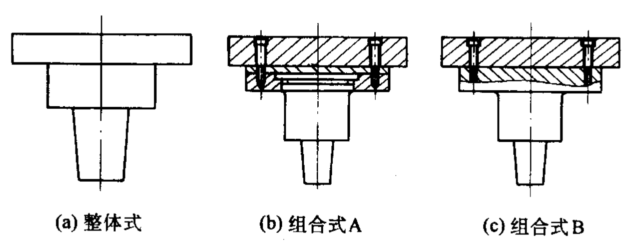


图 6.5-45 凸模结构形式示意图

在选择结构形式时，主要考虑材料和加工等问题，使所设计的结构尽量简单。具体尺寸应根据液锻件的尺寸、形状和模具的其他结构来确定。凸模或挤压头与凹模的配合部分应保证单面间隙为0.05~0.10 mm。间隙不应太小，以免凸模擦伤凹模口；间隙也不应太大，一是容易使金属液喷溅，二是易造成内孔偏心。

对于下间接加压的挤压头（也称活塞），是起到将储液

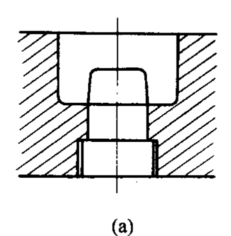


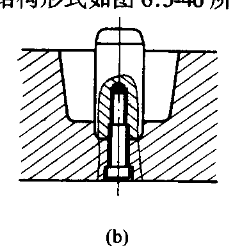
腔中的金属液挤入到模具型腔中的作用，完成后要退回原位，要求其能靠自重落回到原位。因此，其配合间隙应控制在单面 0.10 mm 左右，不能过大，否则金属液挤入到配合间隙中，造成卡死现象，使挤压头很难复位，但也不能太小，当挤压头温度升高时，易使间隙过小或无间隙，给挤压头的复位造成困难。

6.6 型芯与镶块设计

在液锻模具中，对于形状复杂的液锻件，其模具的相应结构也很复杂，因考虑型腔加工的难度，考虑热处理变形问题，为了便于更换和维修易损零件，有时还考虑模腔排气问题等，在模具，尤其在凹模中采用镶嵌型芯或镶块，使复杂形状的模腔加工变得简单容易。因此，合理分解复杂部分，在液锻模具结构设计中显得非常重要。

在型芯和镶块设计中，常用结构形式如图 6.5-46 所示。


(a)


(b)

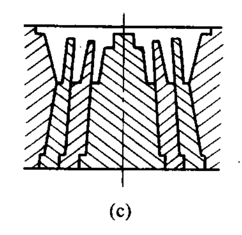

(c)

图 6.5-46 常用型芯及镶块结构示意图

6.7 卸件装置设计

液锻成形完成后，凸模或挤压头应能顺利地从锻件中抽出，尽可能将锻件留在下模，以便利用下顶缸和模具中的顶出机构，将锻件顶出凹模。在液锻中，常遇到凸模或挤压头压入锻件，或者锻件成形时带有芯轴，成形结束后锻件紧紧地包住凸模、挤压头和型芯上，在开模过程中要抽出凸模、挤压头和型芯，这时可利用上模回程、辅助液压缸或其他机械方式完成。在抽出过程中锻件有可能随动时，应考虑对锻件的约束，使之与凸模、挤压头和型芯分离。图 6.5-47 给出了卸件的几种方式，具体结构可根据锻件实际形状和尺寸确定。

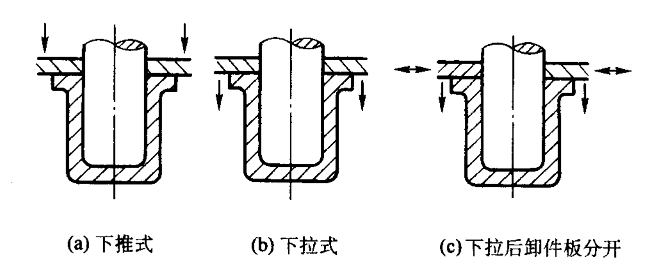


图 6.5-47 卸件装置原理示意图

6.8 顶件装置设计

液锻件成形后，大多数情况下通过卸件装置留在下模，这时要靠顶件装置将锻件顶出凹模。顶件装置一般很简单，其结构就是顶杆，有直接与下顶缸活塞杆联接，也有不直接相联接的，可根据顶杆回位的要求选择，如图 6.5-48 所示。

在设计时要考虑选择带有下顶缸的设备，还要考虑下顶缸的顶出力和顶出行程。当凹模型腔在上模时，锻件出模要靠上模回程时，利用打杆将锻件从凹模中推出，如图 6.5-49 所示。

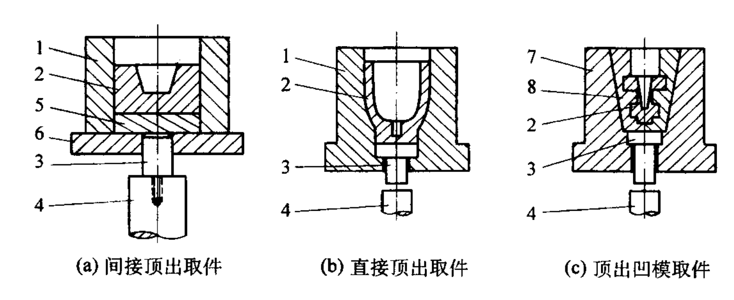


图 6.5-48 顶杆顶件装置示意图

1—凹模；2—液锻件；3—顶件杆；4—下顶缸活塞杆；5—凹模底板；6—下模板；7—凹模座；8—组合凹模

6.9 导向装置设计

同其他模具一样，液锻模具正常工作时，应有可靠的上下模导向装置，液锻模具常选用导柱导套实现上下模的定位，以保证凸模与凹模有均匀的间隙，以此来保证锻件孔的同心度和均匀的壁厚。

导柱导套的结构与冲模或压铸模要求相似，在结构尺寸确定时，必须考虑在凸模进入凹模前，导柱导套先行配合，起到导向定位作用。导柱导套的直径、材料、热处理等选择应合理。液锻模具设计时，尽可能采用后置导柱导套，以避免浇金属液时受到阻挡。

除了采用导柱导套外，还有采用凸凹模自身导向、定位圈导向等，如图 6.5-50 所示。

6.10 排气槽与溢料槽设计

液锻时，型腔内的气体应在成形过程中顺利排出，有利于液锻件成形质量，保证锻件轮廓清晰，减少或消除锻件内部的气孔、针孔等缺陷的产生。

当液态金属浇入模具后和成形过程中，为了使模具型腔内的气体顺利排出，可利用模具的分型面、组合型芯配合面、顶杆配合间隙、凸凹模配合间隙等，开设排气槽，排气槽的尺寸应根据锻件大小和开设部位确定。一般宽度在 5 ~ 20 mm 内选择，深度在 0.1 ~ 0.2 mm 内选择，开设长度应根据排气通道的走向和模具结构确定。除此之外，还可在容易



憋气的部位开设排气孔或排气塞，排气孔的孔径不应大于 0.20 mm；排气塞圆柱端与孔的单面配合间隙 0.1 ~ 0.12 mm，直径根据锻件尺寸在 2 ~ 12 mm 内选择，螺纹端的底径应大于圆柱端直径。

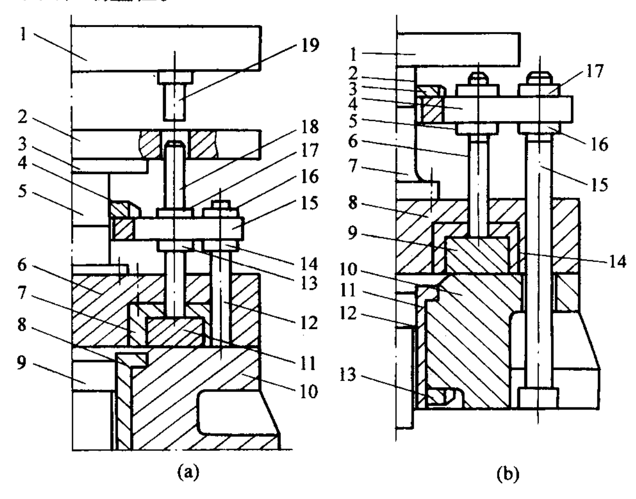


图 6.5-49　打杆式顶出机构示意图

(a) 上模打杆式 A

1—上横梁；2—活动横梁；3—上模板；4—防推螺母；5—模柄；6—凹模座；7—凹模；8—压套；9—储液腔；10—下模座；11—液锻件；12—复位杆；13、14、16、17—螺母；15—卸料横板；18—打料杆；19—顶杆

(b) 上模打杆式 B

1—上模板；2、3、5、13、16、17—螺母；4—打料板；6—顶杆；7—模柄；8—上模座；9—液锻件；10—下模座；11—压套；12—压头；14—凹模；15—拉杆

6.11　模板与凸模固定板设计

模板作为上模和下模的安装基座，分为上模板和下模板，安装时主要靠压板将模板固定。在模板上有导柱导套安装时，应当选择矩形模板，其上下模板尺寸大小应当一致，长宽尺寸根据凹模和凸模安装方法和所需空间确定，尽量紧凑。厚度尺寸根据在设备上的安装方式确定，对于下模板整体直接放置在设备工作台上的，如图 6.5-51a 所示，其厚度一般在 30 ~ 40 mm 内选择；对于下模板两侧支撑时，如图 6.5-51b 所示，在不影响顶出机构正常工作时，支撑间距尽可能小，以避免模板在模具工作时，压力对其产生弯曲作用，造成变形或断裂，因此，模板厚度应比完全落实时厚，一般根据锻件尺寸、锻压力大小、支撑块间距等因素，其尺寸在 35 ~ 60 mm 范围内选取。

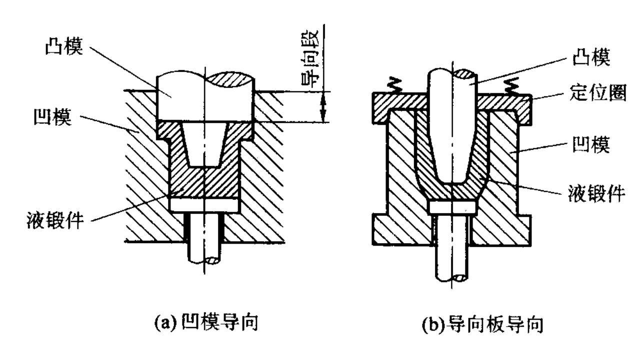


图 6.5-50　其他导向方式示意图

对于采取其他导向方式的液锻模具，即无导柱导套时，其上下模板长宽尺寸不要求一致，如图 6.5-51c 所示，只要不影响上下模具安装，尺寸应尽可能紧凑，也可以选用圆形模板，其厚度尺寸可参考矩形模板。

对于凸模的安装，除了整体凸模，一般靠凸模靠固定板固定在上模板上，凸模固定板尺寸依据凸模确定，尽可能紧凑，固定螺钉的个数和规格应通过凸模抽拔力的校核后确定，应保证使用安全、可靠。凸模固定板的安装结构常用的有三种，如图 6.5-52 所示。

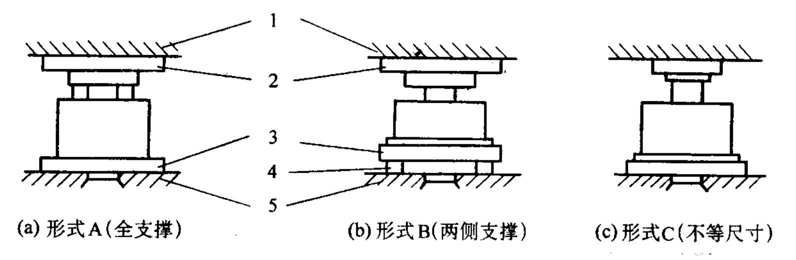


图 6.5-51　模板结构形式及安装示意图

1—活动横梁；2—上模板；3—下模板；4—支撑块；5—工作台

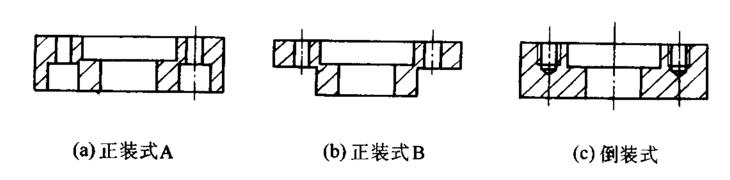


图 6.5-52　凸模固定板结构示意图

6.12　侧分型机构设计

液锻模结构中，当锻件结构越复杂模具结构也相应复杂，对于带有侧凹、侧凸、侧孔的锻件，考虑成形后锻件的出模，有三种方式分型取件：一是将锻件连同组合凹模一同顶出，在模外分型取出锻件，这种方法一般用于小尺寸锻件，其组合凹模结构简单、尺寸不大、重量轻，便于人工操作，适用于小批量生产；二是利用侧分型机构，在开模过程中将组合凹模分开取出留在凹模中的锻件；三是在模具设计时，采用专门的液压动力装置开合凹模，当上模离开下模后，通过液压缸打开下模取出留在凹模中的锻件。

(1) 模外分型取件

顶出凹模取件的模具结构形式较简单，一般组合凹模与模座采用锥度配合，配合锥面一般为 3° ~ 7°，如图 6.5-53 所示。

(2) 侧分型机构分型取件



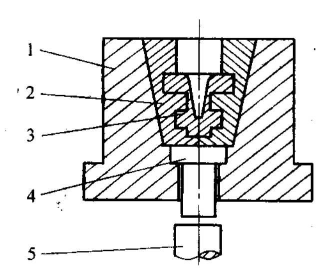


图 6.5-53　顶出后模外分型示意图

1—凹模座；2—组合凹模；3—液锻件；
4—顶件杆；5—下顶缸活塞杆

1）斜导杆式。斜导杆分型开模机构，如图 6.5-54 所示，是将斜导杆安装在凹模内，与组合凹模中的斜孔相配，在凹模顶出时受斜导杆的约束沿斜导杆轴线方向运动，使得凹模分开将锻件取出。

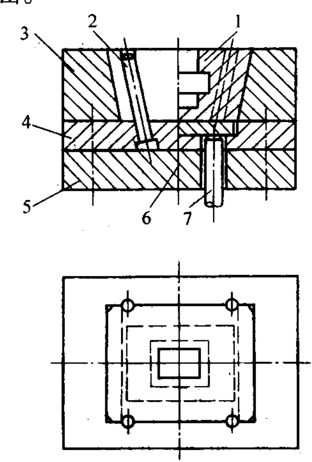


图 6.5-54　斜导杆分型机构示意图

1—可分凹模；2—斜销；3—模套；4—压板；
5—模座；6—垫板；7—顶杆

2）斜键式。斜键分型开模机构，如图 6.5-55 所示，是将斜键安装在凹模座内腔组合凹模分型位置处，用于约束凹模顶出时的走向，使凹模从分型面分开取出锻件。

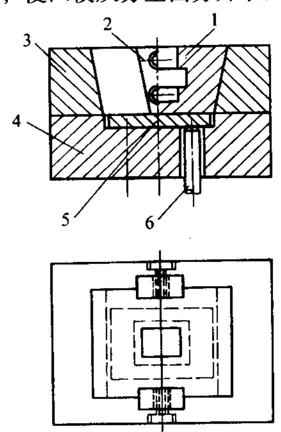


图 6.5-55　斜键分型机构示意图

1—可分凹模；2—斜键；3—模套；4—下模座；5—垫板；6—顶杆

3）燕尾式。燕尾式分型开模机构，如图 6.5-56 所示，是将凹模斜面部分与凹模座以燕尾配合，在组合凹模顶出时，使凹模沿斜面方向移动，分型面分开取出锻件。

以上三种分型时靠顶出杆顶出，合模时靠自重或上模下压合模，为防止凹模脱出凹模座，一般要限制顶出行程，或设计限位装置。

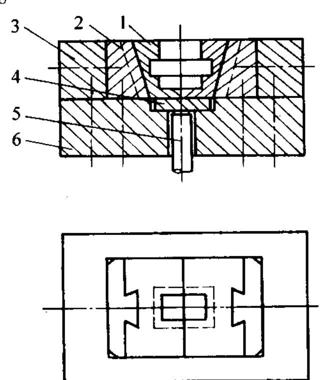


图 6.5-56　燕尾分型机构示意图

1—可分凹模；2—燕尾镶块；3—模套；4—垫板；5—顶杆；6—模板

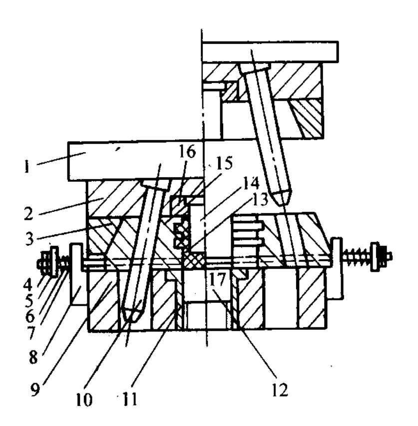


图 6.5-57　斜导柱分型机构示意图

1—上模板；2—固定板；3—锁紧块；4—螺母；
5—档板；6—拉杆；7—弹簧；8—定位板；9—下模座；
10—斜销；11—压套；12—压头；13—液锻件；14—型芯；
15—可分凹模；16—型芯压板；17—导板

4）斜导柱分型式。斜导柱分型机构，如图 6.5-57 所示，斜导柱安装在上模板，通过约束安装在下模分型块上的斜孔，控制下模分型块的开合。分型块可根据锻件的复杂程度设计成两半模、或四半模。分型块拉开后，必须有限位和定位措施，以保证斜导柱在合模时能顺利插进分型块的斜导孔中，使分型块顺利合模。

这种模具结构一般用于下加压式间接液态模锻，模具打开取出锻件、清理模具，将液态金属浇入储液腔后，分型块靠液压机上缸的压力闭合，下顶缸将金属液挤入型腔，完成成形。

5）弯销分型式。弯销分型机构与斜导柱分型机构的原理一样，如图 6.5-58 所示，不同点在于弯销的直臂部分使凹模先不拉开，先完成抽芯后再分开凹模取出锻件。

6）液压分型式。液压分型是利用了在下模安装液压缸来实现凹模的分型与合模，如图 6.5-59 所示，在设计时，液压缸可以采用一个安装在一侧，也可以采用两个对称布置，以保证力的平衡。设计时液压缸应以下模座作为安装基座，形成整个模具整体，以保证模具合模力的平衡。液压缸的选择应根据合模力的大小和开模行程确定。

6.13　模具预热与冷却

1）模具的预热。液锻模在正式用于生产前必须进行预热，预热的方式有燃气加热、电阻加热和金属液加热三种。一般第一种用于尺寸较大、模具外形不规则的液锻模预热，预热器根据被加热部分的形状设计，直接对型腔加热；第二



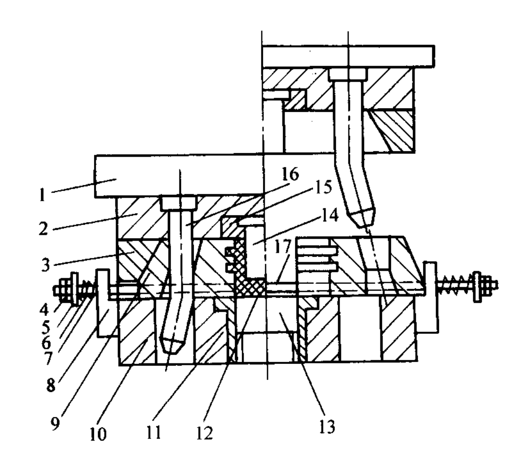


图 6.5-58 弯销分型机构示意图

1—上模板；2—固定板；3—锁紧块；4—螺母；5—档板；6—拉杆；7—弹簧；8—定位板；9—可分凹模；10—下模座；11—压套；12—液锻件；13—压头；14—型芯；15—型芯压板；16—弯销；17—导板

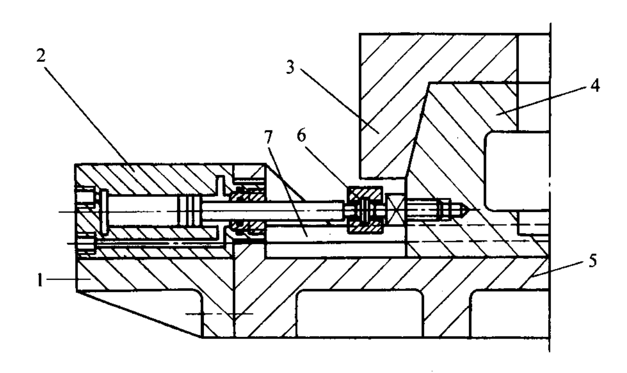


图 6.5-59 液压分型机构示意图

1—支架；2—液压缸；3—锁紧块；4—可分凹模；5—模座；6—活络接头；7—导板

种用于中小型尺寸、外形较规则的液锻模预热，一般采用加热管或加热圈，从模具外表面预热模具；第三种用于小型液锻模具预热，采用直接将金属液浇入到模具型腔，经过 3～4 件的浇铸热量，模具可以开始正常工作。

模具预热温度根据液锻合金对模具工作温度的要求来确定，参见表 6.5-21。

2）模具的冷却。在液态模锻生产过程中，要考虑模具有稳定的温度范围，以保证锻件成形的质量，同时还要考虑模具的使用寿命。对于中、大型模具，要通过强制冷却来控制模具的工作温度范围，采用的是模具内部冷却的方式，冷却介质一般为水。对于小模具，一般采用自然冷却，或表面强制对流冷却方式，通过控制操作节奏，使模具温度控制在工作温度范围。

7 液锻模具材料与热处理

7.1 液锻模具的性能要求

液锻模具用于高温高压条件下，为保证液锻工作的正常进行，必须对模具提出严格要求，一般用于液锻的模具必须具备以下条件。

1）优良的抗氧化性。
2）较高的高温强度。
3）良好的耐磨性。
4）优良的耐热疲劳性。
5）较高的抗腐蚀与浸蚀性。
6）尽可能高的导热性。
7）具有良好的锻造及切削加工性能。
8）具有高的淬透性、热处理变形小。

上述要求相互关联又相互矛盾，但在选材时，应根据设备条件、工艺状况、经济要求等各方面综合考虑，合理选材，以保证模具关键零件使用性能。

7.2 液锻模工作零件的常用材料及热处理要求

液锻模具的工作零件，即凹模和冲头（凸模）等，是与液态金属直接接触的零件，属于热锻条件下工作，根据热锻模具的使用要求，可参考表 6.5-16 选用。其工作条件及性能要求见表 6.5-17。

表 6.5-16 液锻模工作零件常用材料及热处理要求

液锻合金		铅、锡、锌合金	铝、镁合金	铜合金	黑色金属
材料	主用	3Cr2W8VA 5CrNiMo 4Cr5MoSiV1	3Cr2W8VA 4Cr5MoSiV1	3Cr2W8VA 4Cr5MoSiV1	3W23Cr4MoV 3Cr2W8VA
	代用	5CrMnMo 4CrWSi 40CrNi，4CrSi	4CrWNi 5CrNiMo 5CrMnMo		15，45， 40Cr，A3
热处理要求		淬火－回火 HRC48～52	1）不易变形件 型腔 HRC42～46 型芯 HRC44～48 2）易变形件 调质 HRC31～35 氮化 HV800～900	淬火－回火 型腔 38～42HRC 型芯 44～46HRC	1）表面渗铝、退火 2）表面渗硼、或硼铝共渗 42～44HRC

以上液锻模工作零件常用材料的基本性能和热处理规范，可查阅相关模具材料手册。

7.3 液锻模其他零件材料及热处理要求

液锻模其他零件属于模具结构零件，可根据其作用不同，参考表 6.5-18 选用。

7.4 液锻用模具材料的选用原则

根据液态金属的浇注温度不同，选用模具材料时可分为三种使用条件。

1）在 650℃以下工作时，可选用一般结构钢、模具钢。
2）在 650～1 000℃范围工作时，可选用热强钢：如 Fe 基、Ni 基、Co 基合金等。

表 6.5-17 工作零件工作条件及性能要求

工作条件	性能要求	硬度要求	
		液锻合金	HRC
1）反复承受一定压力 2）零件表面与600~1000℃的合金液接触，反复加热、冷却，承受交变热应力 3）受合金液冲刷、挤压 4）受合金液化学腐蚀	1）具有较高的淬透性，以保证力学性能均匀 2）优良的耐热疲劳性。防止出现早期龟裂 3）良好的高温性能。在工作温度下具有足够的强度、硬度、耐磨性和冲击韧性 4）良好的导热性与耐蚀性 5）机械加工性好，热处理变形小	锌合金	50~55
		铝合金	42~48
		镁合金	42~46
		铜合金	38~42
		黑色金属	42~44

表 6.5-18 零件材料及热处理要求

零件名称	主用材料	代用材料	热处理	硬度
模板、支承板、模座、模套、固定板	45，A5	QT40-17 HT20-40 ZG35	正火或调质	28~32HRC 220~250HB
模柄、推杆压板	45，A5	40Cr	调质	28~32HRC 220~250HB
导正销导柱	T10A，9Mn2V	T8A	淬火、回火	52~57HRC
导套	T10A，9Mn2V	T8A	淬火、回火	47~52HRC
斜销斜键 导滑镶块	5CrNiMo 5CrMnMo T10A	T8A 60	淬火、回火	45~50HRC
导板、顶杆	45，40Cr	A5	淬火、回火	43~48HRC
打料杆 垫板	T8A 40Cr	45	淬火、回火	45~50HRC
打料板	45，A5	40Cr	调质	220~250HB
导向环	HT20-40	HT15-33	退火	
顶管	$3Cr_2W8VA$	5CrNiMo	淬火、回火	47~53HRC
中间套	A3，A5	45	调质	
弹簧	50CrVA $60Si_2CrA$	65Mn $60Si_2MnA$	淬火、回火	40~48HRC

3）高于1 000℃工作时，可选用难熔金属、金属陶瓷等。

上述三种条件对应以下类别的金属

1）铅、镁、锌等低熔点合金用模具材料。铅、镁、锌等合金的浇注温度分别为600~740℃，630~680℃和400~450℃。模具主要以机械磨损和粘焊为主要破坏形式，一般选用热强模具钢，可经调质处理再进行氮化或氰化表面处理。国内多用铬钨钒钢，典型材料为3Cr2W8V钢，多用铬钼钒钢，典型材料为H13。

2）铜合金用模具材料。铜合金的浇注温度约为900~1 180℃，起模具粘焊、热疲劳、表面氢化等，比铝合金液锻时严重的多。国内外多采用3Cr2W8V等铬钨钒类钢，调质处理后使用。对于冲头、型芯等受热、受力大的零件，也可采用难熔合金。

3）黑色金属用模具材料。钢和铁浇注温度约1 300~1 600℃，热疲劳裂纹和熔蚀是模膛主要的破坏形式，因此，凹模底板、推杆、套筒等，多采用铬钨钒或铬钼钒等模具钢，并经调质处理后使用。对于小批量或制件尺寸精度要求不高时，可采用低碳钢。

8 液锻模具技术要求

液锻模具属于在高温下使用，因为受温度变化的影响，液锻模具在温度分布不同的零件中，易造成由温度引起的尺寸变化，因此，在模具零件加工，装配时，应在配合尺寸选用时给予足够的重视。另外，因加工手段的不断提高，模具的加工尺寸精度应根据零件的位置功能合理选用精度登记等级。对于液锻模，除了主要的工作零件外，在加工制造时对模具零部件尺寸的技术要求如下。

1）各零件未注尺寸的极限偏差按GB/T 1804规定的IT14级，孔尺寸为H14，轴尺寸为h14，长度尺寸为$\pm\frac{IT14}{2}$

2）各零件未注明倒角一般为C1。

3）未注明的铸坯件圆角为：$R3\sim R5$ mm。

4）铸坯件非加工表应平整光滑、无凹凸缺陷。

5）锻坯件不应有过热、过烧组织，不应有锻造缺陷。

6）铸坯件应在加工前进行时效处理，锻坯件应在加工前进行退火或正火处理，以消除内部残余应力。

7）加工后的零件表面不应有任何铸造和锻造缺陷和机



械损伤。

8）热处理后的零件，硬度均匀，不允许有任何热处理造成的缺陷。

9）对于大尺寸，较重的零件应有起重孔和环。

10）模板类零件在厚度方向上两平面平行度应在100 mm长度内不得超过0.02 mm。

11）模板、模座等零基准角面与板底平面垂直度在100 mm内不得超过0.02 mm。

液锻模具装配后的技术要求如下。

1）模具装配后，模具自由闭合状态下，模具上底面与模具支承面之间平行度误差在100 mm长度内不得超过0.03 mm。

2）模具在有导柱的约束下或安装在设备上，分型面应处于闭合状态，有配合的部分的间隙应保持均匀。

3）导柱、导套装配后，其轴线与模板的平面垂直度误差在100 mm内不大于0.015 mm。

4）凸模与凹模、压头与压套配合间隙应均匀，其误差不大于间隙值的1/4～1/5。

5）模具装配应当留有定位标记，以便维修拆装时保持原有要求。

6）模具总装后，其中相对运动零件应灵活自如，在室温下无卡阻现象，在加热工作时不应有刮、磨或卡滞现象。

9 液态模锻主要工艺因素及控制

液态模锻是铸锻结合工艺，为得到优质的液锻件，必须了解该工艺中起主要作用的工艺因素，合理选用工艺参数，并通过一定技术手段稳定控制这些参数，以保证工艺过程的规律性和稳定性，从而保证优质件的生产。

在液锻中，几个重要的工艺因素是：液态金属的质量、液态金属的浇注温度、工作时模具的温度、成形时的压力（比压），制件充型后的保压时间，模具的润滑等。这些工艺因素不仅对液锻件质量有影响，它还对模具寿命有影响，下面分别讨论。

9.1 金属液的质量

金属液的质量是保证液锻件质量的前提，如果金属液质量处理不好，会在液锻件内部留下许多缺陷。由于金属液的处理属于铸造范畴，针对不同金属及其合金，都有严格的金属液处理工艺和方法，无论是锌、镁、铝、铜类合金及钢，液锻前其金属液处理要求有除渣、除气、防止非金属元素的侵入，控制有害杂质的超标，金属液保温温度及时间等。为确保质量，应严格按照工艺操作，包括材料检验、熔炉坩埚或炉衬清理，选择合适的除渣剂、除气剂，认真实施操作等，保证每个环节达到预期的效果，为液态模锻提供合格的金属液。

9.2 浇注温度

将处理好的金属液，通过定量浇注装置，或人工浇勺，按所需的浇注量浇入模具中，在浇入过程中，金属液易产生卷裹气体现象，同时要求浇注时金属液温度应足够高，以使卷入的气泡能自行溢出，否则易使浇注时卷入的气体留于模具内的金属液中，成形时造成气孔缺陷。

浇注温度过低，还会引起所需成形力增加，对模具的受力也有影响。浇注温度过高使金属液体积膨胀，收缩率增大，对模具寿命也有影响，而且过大的收缩会造成裂纹和收缩孔。不仅不利于排气，也不利于成形流动。

表6.5-19为普通碳钢浇注温度与缩孔容积的关系，是浇注温度越高，缩孔容积越大。

表6.5-19 普通碳钢浇注温度与缩孔容积大小关系

浇注温度/℃	缩孔容积/%
1 500	6.3
1 550	7.4
1 650	9.5
1 750	11.6

含碳量在0.2%～0.5%钢的合适浇注温度：

t_{pt} = 包晶反映温度 + 结晶温度区间 + 30～150℃

则：20钢的浇注温度是1 550～1 600℃，50钢的浇注温度是1 520～1 560℃。

对于有色金属及其合金，浇注温度也与其熔点有关，一般应在其熔点（液相线）以上30～50℃为宜，为避免液锻件中的含气量防止粘模，则希望金属液浇注温度尽量低些，可以采取控制浇注速度的办法，使浇入的金属液达到满足工艺要求的温度以保证液锻件质量。通常，液态模锻工艺的合金浇注温度比一般铸造工艺的稍低些，表6.5-20列出了常用材

表6.5-20 常用液锻合金的浇注温度范围

合金类别	牌号	浇注温度/℃	合金类别	牌号	浇注温度/℃
铝合金	ZL102	640～690	青铜	ZQSn10－2	1 100～1 180
	ZL101，ZL103 ZL104，ZL105	640～720		ZQSn10－1	1 050～1 150
				ZQSn5－5－5	1 100～1 170
	ZL203	670～720		ZQSn3－7－5－1	1 100～1 160
	ZL301	640～720		ZQSn6－6－3	1 050～1 100
	ZL302	680～730		ZQAl9－2	1 100～1 150
	ZL401	600～620		ZQAl10－3－15	1 120～1 170
	LC4，LY12， LD11，LD2，LD8	680～720		ZQAl9－4	1 100～1 150
				ZQAl10－4－4	1 150～1 180
黄铜	ZHSi80－3	980～1 030	镁	ZM5	710～760
	ZHSi80－3－3	950～1 000	纯铝		700～730
	ZHPb59－1	960～1 000	钢		1 530～1 560
	ZHMn58－2	900～970	灰口铁		1 250～1 330
	ZHMn57－3－1 ZHMn58－2－2	920～1 000	可锻铸铁		1 380～1 420



料液态模锻时浇注温度范围，相近牌号的材料可以参考选用。

浇注温度的选用与合金成分、液锻方式、液锻件结构等因素有关。对于间接加压（挤压）方式液态模锻、制件形状复杂、薄壁，合金结晶温度范围窄的液锻合金等，其浇注温度取上限；对于采用直接加压方式液态模锻，制件形状简单、壁厚，以及合金结晶温度范围宽的液锻合金等，其浇注温度取下限。

9.3 模具预热温度

液锻模具温度对液锻件成形质量和模具的使用寿命有直接影响。模具温度低，金属液浇入模具后迅速凝固，不利于金属的流动，易产生缺陷，还会使所需成形压力增大；模具温度过高，润滑剂（涂料）不易附着在模具表面，成形时易使金属粘模，锻件脱模时不仅拉坏锻件，也会使模具产生变形或表面损伤。

为使模具保持良好的工作状态和较长的使用寿命，使用前不仅要预热到一定温度，工作时还要控制生产节奏，或采取冷却措施，保证模具工作温度的稳定。液锻时模具工作温度范围列于表6.5-21。

表 6.5-21 液锻模具工作温度范围

合金	工作温度范围/℃	合金	工作温度范围/℃
锌合金	150～200	铜合金	200～350
铝合金	150～300	钢	150～400
铝镁合金	170～280	铸铁	150～400
镁合金	150～250		

9.4 成形压力（比压）

液锻时，一般用单位压力（比压）的大小来衡量其在成形时的作用，比压 p 是指施压的压力 p_0 与施压面积 A_0 之比，即：

$$p = p_0 / A_0$$

压力 p_0 由设备提供，可以根据工艺要求选定；施压面积 A_0，一般指模具与液态全面接触的部分在分型面上的投影面积。

液锻时，成形压力的作用如下。

1）主要是挤压液态，或半液液态的金属流动充型，使已凝固的金属产生塑性变形。

2）压缩成形金属体积，以利于补缩作用，避免形成缩孔和疏松。

3）压力还可使已分散在金属液中的气体不易折出聚集形成针孔或气泡。

4）压力对金属液的结晶过程有较大影响，使凝固温度升高，提高了金属凝固的过冷度，有利于得到细晶组织，并避免合金的密度偏析。

5）压力可提高制件表面质量和尺寸精度，也改善制件成形时的散热条件。

成形时比压的选用常按经验公式，但一般根据试验对试样进行分析后选择一合理的比压值，一般常按以下范围选用便可保证工艺要求：

低限比压值：40～60 MPa；

密实比压值：60～100 MPa；

高限比压值：100～150 MPa；

9.5 保压时间

金属液在合适的成形压力（比压）的作用下，从建立压力开始到模具中的液态金属完全凝固所需要的时间，它是保证液态金属在整个凝固过程中，完全处于压力作用下，以保证压力对金属凝固的影响和作用。

保压时间的长短与液锻件的材料、体积和形状有关，也与加载方式有关。保压时间太短会使制件内部产生收缩缺陷，时间太长增加了生产周期，会使模具温度升高过快。因此，液锻时应根据锻件的尺寸、形状和材料等，保压时间应在6～30 s内选择。

10 液锻模具用（润滑剂）涂料

10.1 液态模锻模具用涂料的作用

液态模锻工艺的正常进行，除工艺参数控制外，模具的涂料使用也是关键条件之一，如何使金属模具在高温金属液的交互作用下延长使用寿命，又能保证获得优质锻件，模具涂料起到了重要作用。

1）模具涂料可减少高温对模具型腔的“热冲击”，以减少型腔的交变热应力。这一作用主要是靠增加液态金属与模具接触面热阻，降低表面受热的剧烈程度，从而降低温度应力差。

2）模具涂料可降低模具的导热率，使金属液的热量在加压前尽可能损失少，保证金属液能有较好的流动性，从而保证液锻时金属液有良好的充型性能。

3）模具涂料层可避免金属液直接与模具表面接触，避免了金属液成型时与模具腔壁的黏附和熔焊。

4）模具涂料能够减少成形后的锻件与模具型腔、型芯表面的摩擦系数，即可以提高锻件的表面质量，又便于锻件顺利脱模。

5）在喷涂料时，可以起到对模具型腔表面进行冷却，以调节模具工作温度，保持模具工作温度在一定范围。

10.2 液态模具用涂料的性能要求

1）应有足够的耐热性，高温时不易分解或熔化。

2）涂料的化学稳定性好，不应与模具、金属液产生化学反应，不易产生气体。

3）无异味、不产生有害气体。

4）涂料喷涂黏附性好，连续性好，分布均匀。

5）有较小的热导率，能起到隔热作用。

6）资源丰富、价格低廉、配制简单、使用方便、易于清理。

10.3 液锻模具常用涂料及喷涂工艺

液锻的材料种类较多，根据液锻时的合金类型及浇注温度不同，液锻用涂料的种类也很多。表6.5-22列出了常用涂料的配制及使用范围，使用时可根据成型材料对象、生产批量等合理选用。

为使涂料在液锻时充分发挥作用，在使用时应按以下步骤进行。

1）清理模具，每次锻后仔细观察模具表面，清除残留金属渣及毛刺等，如有粘附金属必须铲除。

2）喷涂前模具预热，考虑涂料的黏附和溶剂的蒸发，根据所用涂料不同，模具必须预热到一定程度，按照液锻金属类型不同，参见表6.5-23。

喷涂注意事项如下。

1）涂料采用喷涂方式，操作时注意观察表面涂料覆盖是否均匀，避免漏涂或涂层不连续。

2）控制生产节奏，待涂料的溶剂挥发后，模具才能正常使用。

3）对于有排气要求的模具，在喷涂涂料后，应重点清理排气道，以免堵塞排气道造成的液锻件质量问题。



表 6.5-22 常用涂料

序号	原材料名称	配比/%	配制方法	适用范围
1	胶体石墨	水剂 油剂	成品（上海胶体化工厂）	用于铝合金液锻件，能有效地防止粘模，常用于压头、压套及易咬合的部位
2	高压聚乙烯（熔融指数为2.1左右）	5	将聚乙烯加入预热好的煤油中，升温搅拌，直至聚乙烯完全溶解后待用。加热温度不可骤然上升，最高不可超过70~80℃	用于铝合金、镁合金液锻件。喷涂在型腔、压头、压套、浇道等部位，效果显著
	煤油	95		
3	蜂蜡（或工业黄蜡）		块状或保持在温度不高于85℃的熔融状态	锌合金液锻件，用于型腔、型芯等部位
4	锭子油30#或50#		成品	锌合金液锻件，作润滑用
5	石墨	5~10	将石墨研磨后过200目筛，加入40℃左右的润滑油，搅拌均匀	铝合金液锻件用于压头、压套部位，效果良好
	润滑油	95~90		
6	氟化钠	3~5	将水加热至70~80℃，加入氟化钠，搅拌均匀	用于因合金液冲刷而产生粘模的部位，有特效
	水	97~95		
7	铝粉	13	将猪油熔化，加入余量煤油，依次加入铝粉	用于液锻出螺纹、螺孔的液锻模型腔
	猪油（工业用）	80		
8	润滑油	40	加热至润滑油与蜡混合均匀，倒入圆筒形模具中，成笔状或熔融状态使用	铝合金液锻件，用于压头、压套等部位可防粘模
	石蜡（或蜂蜡）	60		
9	石墨	30	将石墨研磨后过200目筛，加入40℃左右的润滑油，搅拌均匀	铜合金液锻件
	润滑油	70		
10	氧化锌	5	将水和水玻璃混合，再加入氧化锌，搅拌均匀	中、大型铝合金、锌合金液锻件
	水玻璃	1.2		
	水	93.8		
11	硅橡胶	3~5	将硅橡胶在汽油中溶解，在使用时加入1%~3%铝粉	铝合金液锻件，用来提高合金的表面质量
	铝粉	1~3		
	汽油	余量		
12	石墨	5	将石墨研磨后过200目筛，加入40℃左右的润滑油，搅拌均匀	铜合金液锻件
	锭子油	95		
13	二硫化钼	15	加热溶解后，搅拌均匀	铝合金液锻件
	黄蜡	25		
	润滑油	余量		
14	玻璃粉	10	搅拌均匀	黑色金属液锻件
	水玻璃	12		
	三氧化二铝	5~6		
	碳酸钙	3~6		
	2%~3%氧化锌水溶液	余量		

表 6.5-23 不同材料液锻模具预热温度 ℃

液锻合金	预热温度	液锻合金	预热温度
铝合金	120~200	铸铁	80~150
镁合金	120~200	铸钢	100~250
铜合金	约100	—	—

4）对于深而窄凹角、转折等的型腔部分，易沉淀过多的涂料，必须经常清除，避免造成液锻件轮廓不清晰。

5）喷涂次数应根据所用涂料的种类、每次成型后涂料层的破坏情况，以及液锻件表面质量等因素，确定喷涂次数，一般通过工艺试验来确定。

编写：王家宣（南昌航空工业学院）



参考文献

1 洪深泽主编．挤压工艺及模具设计．北京：机械工业出版社，1995
2 吴诗惇．冷温挤压技术．北京：国防工业出版社，1994
3 谢建新，刘静安．金属挤压理论与技术．北京：冶金工业出版社，2001
4 林法禹主编．特种锻压工艺．北京：机械工业出版社，1991
5 编写组编著．锻压技术．北京：国防工业出版社，1990
6 盛晓敏等编著．先进制造技术．北京：机械工业出版社，2000
7 《锻模设计手册》编写组．锻模设计手册．北京：机械工业出版社，1991
8 罗守靖等著．钢质液态模锻．哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1996
9 陈炳光著．液态金属模锻模具设计．武汉：华中理工大学出版社，1989
10 中国机械工程学会锻压学会编．锻压手册：第1卷，锻造．北京：机械工业出版社，2002
11 中国机械工程学会锻压分会半固态加工学术委员会，中国有色金属学会合金加工学术委员会编．第一届半固态金属加工技术研讨会论文集．北京，2000
12 中国机械工程学会锻压分会半固态加工学术委员会，中国有色金属学会合金加工学术委员会编．第二届半固态金属加工技术研讨会论文集．深圳，2003



第7篇

板管特种成形

主　编　李明哲　蔡中义

编　写　李明哲　蔡中义　黄良驹
韩英淳　李东平

审　稿　中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会



第1章　板管的介质成形

对于广泛应用于机械、石化、汽车、建材等行业中的一些采用传统的冲压工艺难以成形的复杂的板金件与异型管件，采用下述的介质成形工艺分别能收到显著的节材、节能、简化工艺过程并降低制造成本等综合经济效益。

1　薄板件的介质成形

1.1　薄板件的弹性介质成形工艺

（1）成形原理与特点

利用弹性介质，如天然橡胶或聚氨酯橡胶（聚氨基甲酸酯、聚氨基甲酸乙酯；PUR）压缩变形时作用在坯料上的力，使板料产生塑性变形而获得合格成形件的方法，它属于软模成形的范畴。相对于刚性模成形，弹性介质成形具有如下特点与优点。

1）成形精度高，表面质量好。由于其在成形时采用一软一硬的凸、凹模结构，故成形过程中能利用弹性介质的流动性能，使材料受力均匀，贴模良好，从而能保证零件正确的几何形状。

2）模具结构简单，易于制作，制模周期短，成本低。同时操作方便，生产率高。

3）当采用弹性介质做凹模进行拉深时，能形成较有利的应力及应变状态，故能达到较大的变形程度，并能免除起皱及破裂等缺陷。

这种成形方法的缺点是：弹性介质的加载压缩曲线与回程的卸载曲线不重合，产生滞后会引起自身发热，尤其在大变形和高速变形时更为严重。因此，必须对压缩变形量和压力机的速度予以限制。另外，弹性介质（橡胶）耐高温性能差，工作温度应在80℃以下；耐水解性差，不宜长期在潮湿环境中工作。

（2）弹性介质成形工艺过程与模具结构

弹性介质成形可用于弯曲、拉深及成形等。

1）聚氨酯橡胶弯曲工艺及模具结构形式。用聚氨酯橡胶代替传统的钢制凸模或凹模在通用压力机上即可对坯料进行弯曲变形。下面以常用的V形零件的弯曲为例，介绍聚氨酯橡胶弯曲模的设计要点。

由于此类零件的弯曲成形区较集中，故可采用下装的敞开式凹模。模具结构采用下装式通用模结构（图7.1-1a），聚氨酯橡胶凹模通过模框装于下模座上。成形时钢制凸模压入凹模的深度分为两部分：即贴模深度 h_1 与校形深度 h_2，前者与板料厚度、材料性能以及聚氨酯橡胶的硬度有关，后者则对弯曲件的精度（回弹值）有直接影响（图7.1-1b），设计时凸模的宽度 b_1 不能超过聚氨酯橡胶垫宽度 b 的75%，即 $b_1 \leqslant 75\% b$。聚氨酯橡胶垫的高度 $h \geqslant 3h_3$。

关于弯曲力的计算可按下式，即

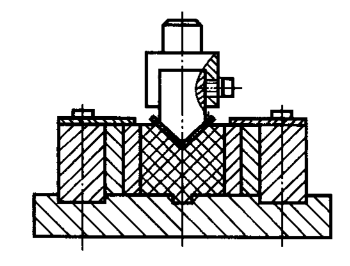
$$F = 1.2A\sigma_b\sqrt{t^3} \qquad (7.1\text{-}1)$$

式中，F 为弯曲力，N；A 为最大载荷时凸模的投影面积，mm^2；σ_b 为抗拉强度，MPa；t 为材料厚度，mm。

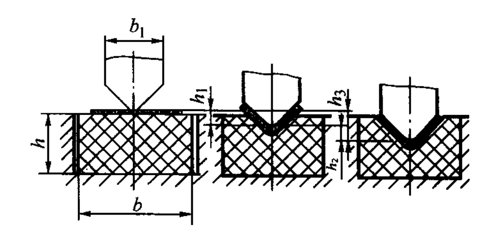
为保证凹模有足够的寿命，对聚氨酯橡胶凹模的单位压力，通常控制在50~60 MPa范围内，弯曲材料的最大厚度为 $t \leqslant 4$ mm。

设计此类弯曲模还应注意以下几点。

1）应严格控制聚氨酯橡胶的变形程度。为了提高使用寿命，变形程度不能超过橡胶垫厚度的1/3。



(a) 模具结构



(b) 有关尺寸的关系

图7.1-1　下装式聚氨酯V形件通用弯曲模

应根据冲压件的形状选用不同硬度的橡胶。当弯曲变形区比较集中且需要较大变形力时应选用硬度大于70AS的橡胶。当材料厚度小于2 mm时橡胶硬度按表7.1-1选取。

表7.1-1　聚氨酯橡胶硬度选择表

工件材料	邵式硬度 AS
钢板 1Cr18Ni9Ti、10、08F 钢	70~80
硬钢带 T8A、T10A、65Mn	70~80
锡青铜 QSn65-0.1、硅青铜 QSi3-1	70~80
黄铜 H62M、淬火后的铍青铜 QBe2	60~70
铝板 L4	60~70

采用聚氨酯橡胶弯曲模可进行不同形状零件的弯曲成形。各种弯曲件成形时所用模具容框结构，成形方法及橡胶的硬度值见表7.1-2。

2）采用天然橡胶的拉深成形及模具结构。此种拉深模具广泛应用于航空工业中成形铝合金蒙皮，因为其制作简单且便宜。通常采用木材或锌基合金就可制成，很适合小批量生产和产品试制。采用橡胶（橡皮）凹模拉深的模具结构如图7.1-2所示。橡皮装在上模的金属容框中，钢制凸模可根据工件的形状进行更换。拉深开始时坯料被压边圈和橡皮压紧，拉深后压边圈起顶件器作用，可将工件从凸模上卸下，橡皮拉深通常在液压机上进行。

当采用橡胶作凹模进行拉深时，同样作为凹模的橡胶垫也应装于金属容框内，用钢凸模对板料进行拉深。用于作凹模的橡胶应具有以下力学性能（HG6—407—71）

邵氏硬度 AS	70
伸长率（%）	600~700
永久变形率（%）	25~30
在 10 MPa 力下的压缩量（%）	50~70



表 7.1-2　不同形状弯曲时所用容框、成形方法及橡胶硬度

名称	零件形状	容框结构与橡胶硬度	成形方法
V形件 弧形件 U形件		(70～80AS)	敞开式
U形件		(80AS)	封闭式
带凸缘U形件		(80AS)	封闭式
闭斜角U形件		(80AS)	封闭式
环形件		(60～70AS)	封闭式
变曲率件		(70～80AS)	封闭式
曲率中心异侧件		(70～80AS)	封闭式

上述用天然橡胶进行浅拉深的方法，可在单位压力为6～8.5 MPa的水压机上对深度不太大的航空用铝合金件进行拉深。

3）采用聚氨酯橡胶的深拉深及模具。这种模具的结构示意图如图7.1-2所示。所用设备上带有液压兼气压的缓冲装置，以形成外部施加的反压力，其缓冲器的压力在工作行程中由自动调节机构来调整。用作凹模的橡胶的压力视拉深材料的种类与厚度而定，在开始时约为3～8 MPa，到最后时可达到30～50 MPa。

采用橡胶作凹模进行拉深有如下优点。

由于橡胶在拉深过程中能形成很大的静水压力，能使坯料紧贴在凸模上，阻止了坯料的变薄和轴向的拉深。另外，

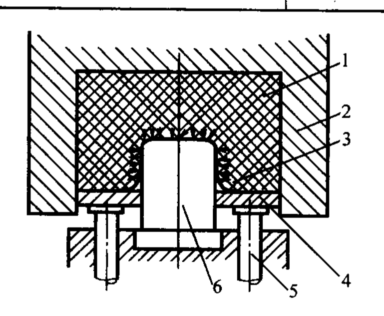


图 7.1-2　采用聚氨酯橡胶凹模的深拉深方法
1—橡皮；2—容框；3—零件；
4—缓冲压边圈；5—缓冲杆；6—凸模



橡胶施加在坯料凸缘上的压力，使凸缘的最大变形成了径向的拉深，这样能阻止皱折的发生，并大大减小了凸缘与口部的变厚程度。

由于这种拉深方法可避免拉深件靠近底部的剧烈变薄及由此引起的破裂现象，形成了较为有利的应力、应变状态，故允许有更大的拉深程度。表 7.1-3 所列是采用单位压力为 40 MPa 的橡胶，圆角半径 $r_t=4t$ 的凸模，拉深筒形件的拉深系数及拉深深度的极限值。

表 7.1-3 用橡胶拉深筒形件时的拉深系数及拉深深度的极限值

材料	极限拉深比	最大拉深深度	坯料的最小厚度	凸缘的最小圆角半径
1060、1050A、3A21 铝合金	0.45	$1.0d_1$	1%，但不小于 0.4 mm	$1.5t$
5A02、2A12、4A01 铝合金	0.50	$0.75d_1$		$2t\sim3t$
08F、08Al 钢	0.50	$0.75d_1$	0.5%，但不小于 0.2 mm	$4t$
1Cr18Ni9Ti 不锈钢	0.65	$0.33d_1$		$8t$

表 7.1-4 中所列的，是采用橡胶拉深不同板料的筒形件时，凸模圆角半径的最小值。

表 7.1-4 用橡胶拉深时圆柱形凸模圆角半径的最小值

拉深系数 m	拉深深度	最小的圆角半径			
		铝合金		08F、08Al 钢	1Cr18Ni9Ti 不锈钢
		1060、1050A、3A21	5A02、2A12		
0.70	$0.25d_1$	$1t$	$2t$	$0.5t$	$2t$
0.60	$0.50d_1$	$2t$	$3t$	$1t$	—
0.50	$0.75d_1$	$3t$	$4t$	$2t$	—
0.45	$1.0d_1$	$4t$	—	—	—

1.2 薄板件的液体介质成形工艺

(1) 成形原理与特点

利用液体介质（水、油或空气）代替刚性凹模，采用刚性凸模将坯料压入凹模，在液体压力作用下使板料拉深成形的方法，它也属于软模成形，并且具有如下特点。

1) 由于是在受反向液压的液压室内的无摩擦状态下成形，故其优点是传力均匀，能使材料在最有利的受力条件下变形，可以提高深拉深极限。

2) 贴模性好，所得零件质量好，表面光滑。

3) 由于液体压力易于控制，压力波动小，适用于大、中型及复杂零件的拉深成形，且模具费用较低。

这种成形方法的缺点是：需采用严密的密封技术，设备吨位较大，且配有增压的高压液压系统，生产效率低。

(2) 液体介质成形工艺过程及模具结构

下面介绍橡胶薄膜液压成形法与充液拉深法两种工艺过程及工装、设备。

1) 橡胶薄膜液压成形（福井液压成形法） 这种液压成形方法的过程如图 7.1-3 所示。图 a 是将板料置于模具上尚未合模充压的情况；图 b 是液压室充液并下行加压；图 c 是凸模上行带着板料压入液压室并拉深成形；图 d 是成形结束。

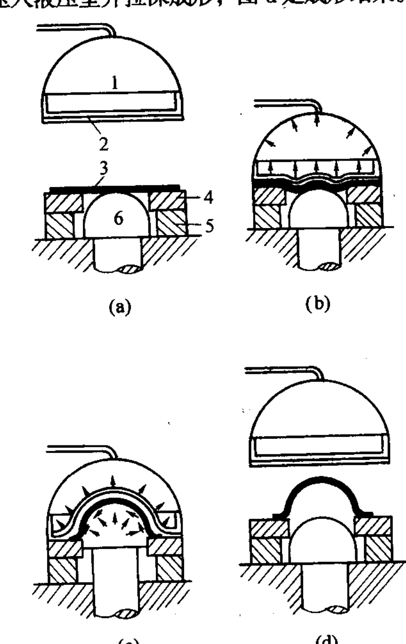


图 7.1-3 橡胶薄膜液压成形过程

1—液压室；2—橡胶膜；3—板材；4—防皱压板；5—压边圈；6—成形模

该液压成形法的加工方法、特点及用途见表 7.1-5。所用成形模具的结构如图 7.1-4 所示。

表 7.1-5 橡胶与液压软模冲压成形方法、特点及用途的比较

名称	加工方法		特点	用途
格林冲压法	P C D	是一种把橡胶装入固定的刚体型腔内或外框的万能模具、进行各种成形加工	1) 适于简单的薄板成形，多品种、小批量生产 2) 对于深拉深由于发生起皱，并垂直壁成形困难，不宜采用 3) 最高压力 20～30 MPa	弯曲加工 剪切加工 浅拉深加工 胀形加工
液压橡皮模成形法	R C D	固定凸模，装在模框内的厚橡胶及压板动作，进行拉深加工。橡胶的压力是通过带有压力控制阀，压力可变的液压缸动作的压板来控制	1) 适用于深拉深加工 2) 与普通法比较，一般提高了深拉深极限 3) 为了抑制起皱，需要非常大的压力 4) 冲床容量变大 5) 最高压力 35～100 MPa	深拉深加工 胀形加工

续表 7.1-5

名称	加工方法		特点	用途
液压深拉深法		把液压橡皮模成形法中固定的凸模安装在可以动的工作台上，在成形中，凸模也可以上升进行成形加工	具有和液压橡胶模成形法同样的特点，与该法相对比，可缩短加工时间	深拉深加工 胀形加工
无凸模深拉深法	C D R	在模体中装入橡皮圈，圈上放有坯料板和平板，凹模用滑块。使液压动作对下面的凹模加压，由于橡胶和坯料板的摩擦而被拉入凹模孔内	1）由于是压应力的变形，所以深拉深的极限（特别是断裂极限）大幅度地提高 2）每次行程拉深深度小，在拉深容器成形时，必须进行连续拉深 3）制件的尺寸精度差 4）拉深时需要的橡胶平均压力，在板厚为 0.8 mm 的软钢板时，为 60 ~ 70 MPa	深拉深加工

注：C—外框（模体）；D—模具；R—橡皮（N. A. Maslennikov）。

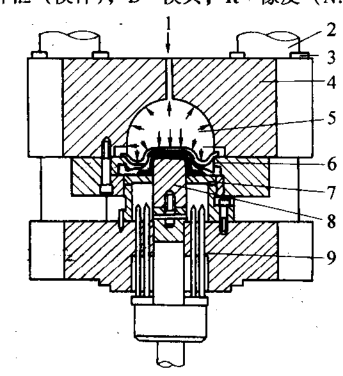


图 7.1-4 橡胶薄膜液压成形用的模具结构图

1—排气阀；2—支柱；3—支柱啮合部分；
4—滑块；5—液压室；6—橡胶膜；7—防皱压板；
8—凸模；9—不规则凸模支棒

图 7.1-5 是采用该方法拉深四边形筒形容器时拉深极限比的比较值。

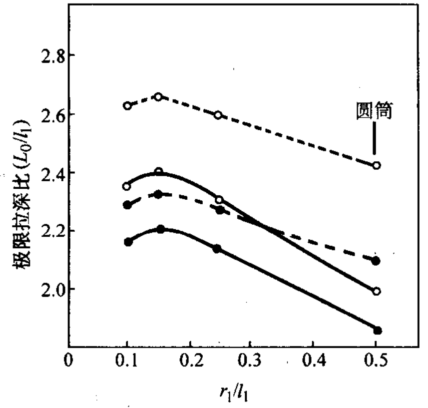


图 7.1-5 四边形筒形件容器深拉深极限的比较

L_1：凸模对边距离（99 mm）；r_1：凸模弯曲部分半径；
L_0：坯料对边距离（坯料直径）；
材料：铝、镇静钢冷轧板；$t_0 = 1.0$ mm
实线：刚体工具法 ∘圆形坯料
虚线：液压成形法 •正方形坯料

2）充液拉深工艺过程与模具设计。所谓充液拉深，就是在凹模中充满了液体，利用刚性凸模压入凹模时所形成的反向液压而成形的过程。充液拉深的成形过程如图 7.1-6 所示。首先开启油泵将液体一直充至凹模面后停泵，将板料放在凹模面上（图 7.1-6a）；之后施加压边力（图 7.1-6b）；然后凸模开始压入凹模，使液压室中的液体建立起压力，并将板料紧紧压贴在凸模上（图 7.1-6c），从而使板料与凸模之间产生很大的摩擦力 μp，这个摩擦力将负担一部分甚至全部成形力，直至成形结束（图 7.1-6d）。

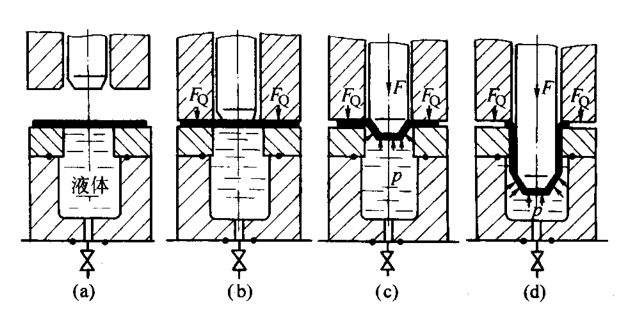


图 7.1-6 充液拉深成形过程

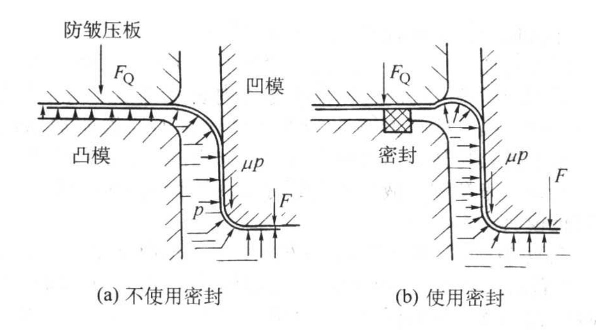
在图 7.1-7a 所示的没有密封的情况下将形成流体润滑状态，即液压室的液体强行从凹模面与板料间流出，从而大大减小法兰与凹模间的摩擦。如果采用密封（图 7.1-7b），液体便无法从法兰下稳定流出，即不能形成流体润滑，但此时却可以更任意自由地用溢流阀调节液压室压力。完全靠凸模进入凹模的自然增压方式往往使初期液压不足，这时可采用强制增压，也就是在压边之后，启动高压泵向液压室注油增压，然后再使凸模压入凹模，实现拉深。

充液拉深与传统拉深相比有以下特点。

首先，由于反向液压的作用，使板料与凸模紧紧贴合，而且板料不直接与凹模圆角接触，形成有利于拉深变形的应力、应变条件。既能缓和板料在凸模圆角处的径向应力，并提高传力区的承载能力，又能使凹模圆角处因摩擦所引起的应力增加为零。因此充液拉深能大大提高成形极限，减少拉深次数。

其次，由于反向液压的作用，板料围绕凸模反胀出一周凸埂，起到拉深筋的作用，故可以抑制内皱的产生，此外因





(a) 不使用密封　　(b) 使用密封

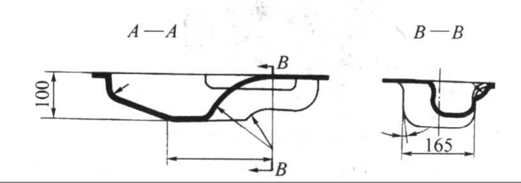
图 7.1-7　充液拉深原理

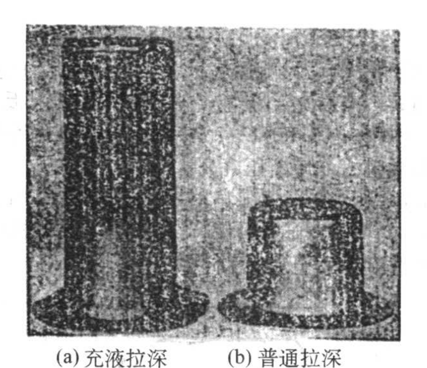
板料紧贴压在凸模上，拉深件内表面精度较高，再加之液压力作用均匀，故仅用一个精度高且外形复杂的凸模便可成形高精度的复杂零件。

第三，因为充液拉深备有刚性压边机构，所以比其他成形方法更容易控制法兰起皱问题。所用设备吨位相对减小，制模周期短，成本较低。

充液拉深因其专用设备复杂、昂贵，使用与维修保养较困难，而且生产效率较低。故充液拉深适用于生产批量不大、质量要求较高的深筒（盒）形件、锥形及抛物线形等复杂曲面零件的成形。

应用实例一：如图 7.1-8a 所示的“江淮 50”拖拉机的油底壳零件，在国产 Y28—450 双动液压机上采用图 7.1-8b 所示的模具成形，收到了制模周期短、制造成本低等综合经济效益。

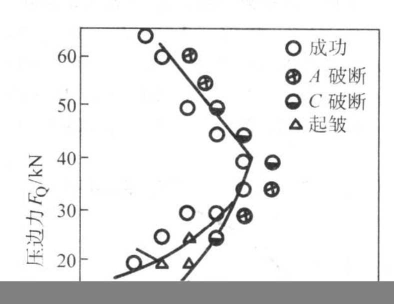




(a) 充液拉深　　(b) 普通拉深

图 7.1-9　不锈钢筒形件充液拉深与普通拉深的比较

边功能，而且还对液压室的建立具有举足轻重的影响。若充液拉深时压边力过小，除了有产生皱纹的可能外，有时还会引起断裂。其原因正是由于压边力太小，不能建立很大的液压，使“摩擦保持效果”不足所致。反之，过高的压边力所引起的液压过大会引起软材料在凹模圆角处反向胀裂。因此，充液拉深的压边力存在一个合理的范围（图 7.1-10）。在实际工作时，要根据零件具体情况反复对压边力进行调整。根据已有的经验，一般取刚性压边与凹模面之间的间隙为 1.1 倍的料厚，即可收到较好的效果。





③ 凹模圆角半径 r_D。此时的凹模圆角半径 r_D，除了像普通拉深时要考虑其对弯曲抗力、角部摩擦抗力的影响外，还应考虑到其对液压力的影响。根据对 SPCE 钢板（$t=0.6$ mm）的实验结果（图 7.1-12），r_D 越小，材料越容易与凹模圆角贴紧形成密封，使液压升高。

图 7.1-13 所示是凹模圆角对成形极限的影响。可以看出，随着 r_D 的增大普通拉深和充液拉深的成形极限都会提高，并逐渐达到最大值。

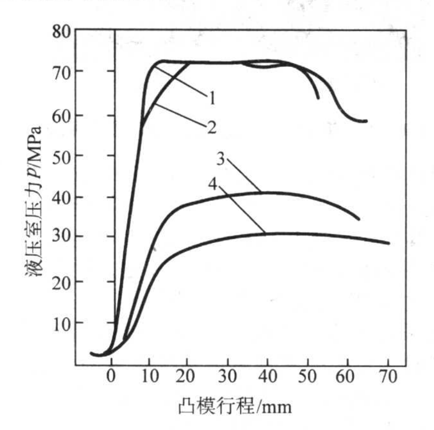


图 7.1-12　凹模圆角半径 r_D 对液压的影响

1—$r_D/t_0=1.7$，$D_0/d_p=2.16$，$F_Q=11.8$ kN；
2—$r_D/t_0=5.0$，$D_0/d_p=2.60$，$F_Q=16.5$ kN；
3—$r_D/t_0=10.0$，$D_0/d_p=2.80$，$F_Q=21.6$ kN；
4—$r_D/t_0=13.3$，$D_0/d_p=2.9$，$F_Q=21.1$ kN

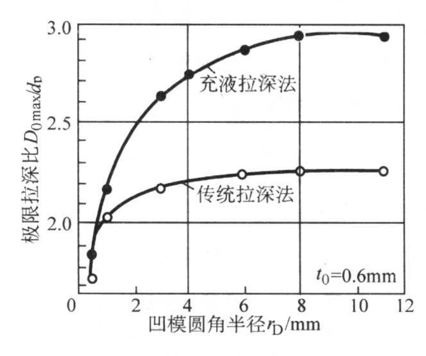


图 7.1-13　凹模圆角 r_D 与成形极限的关系

④ 凸模圆角半径 r_p。图 7.1-14 为用 SPCE 板料，采用自然增压时，凸模圆角半径 r_p 对成形极限的影响。由此可知，对于钢板料而言，在 $r_p=3$ mm 之前，随着 r_p 的增加，成形极限也增大。超过 $r_p=3$ mm 以后，由于支配成形极限的已不再是凸模圆角处的破坏而是凹模圆角处的破坏，所以凸模圆角半径继续增大已不起作用。

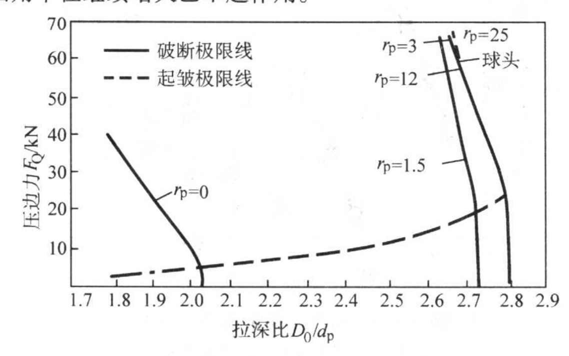


图 7.1-14　凸模圆角半径对成形极限的影响

充液拉深的模具较简单，尤其是凹模不必与凸模形状一致，使模具加工大为简化，而一般普通拉深模的凹模加工要比凸模困难得多。此时凸模需按零件内表面的形状、尺寸设计与制作。凸、凹模圆角半径的尺寸参见前述说明加以确定。至于模具材料，凸模可用铸铁或树脂浇铸，也可用水泥加金属纤维来塑制，液压室则最好采用铸钢或锻钢制作，从而降低模具成本。

充液拉深的应用与普及，在很大程度上取决于专用设备的开发与普及。国外主要生产厂家有德国的 SMG 公司、瑞典的 LAGAN 公司及日本的获野铁工所等。图 7.1-15、图 7.1-16 为瑞典及日本产的 1500 kN 的充液拉深压力机。由于专用设备昂贵，可利用现有的通用液压机改装，进行充液拉深。

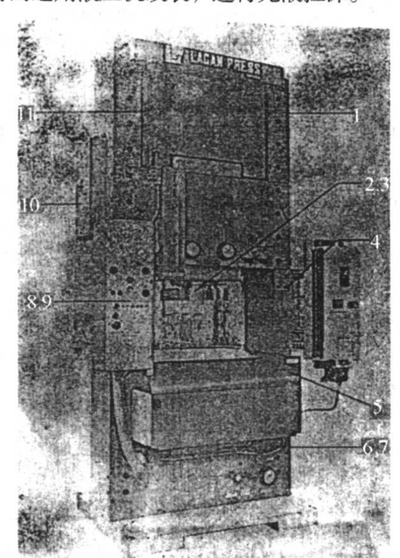


图 7.1-15　瑞典产充液拉深设备

1—框架；2—主缸；3—辅助液压缸；4—高度调节缸；5—工作台；6—压边台；7—压边缸；8—阀控制板；9—控制装置；10—电气装置；11—泵系统

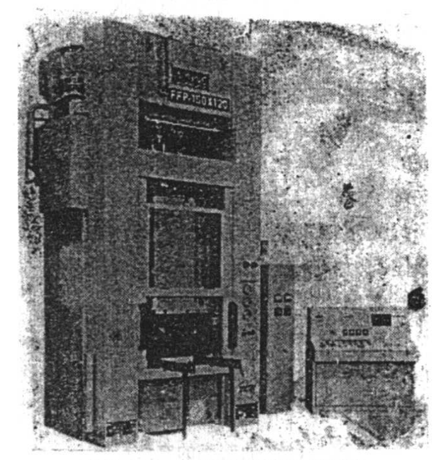


图 7.1-16　日本产充液拉深设备

4）对向液压拉深工艺的特点及应用。对向液压成形法是在液压室内施加对向液压作用，成形过程中液压室内的压力在凸模把板料压入时均匀地作用在成形件上，而获得与凸模形状一样制件的加工方法。该工艺是日本的中川威雄、中村和彦等于 20 世纪 70 年代开发的。该工艺是在专用双动液压机上进行，其成形设备与模具的结构简图如图 7.1-17 所示。压机的内滑块 1 上装有凸模 4，外滑块 2 上装上压边圈 3。凹模 6 装于液压室 7 上，其间装有防止液压室油液外泄的 O 形油封 8。液压室下部设有由卸料油缸 9 推动其上下运动的卸料器 10。



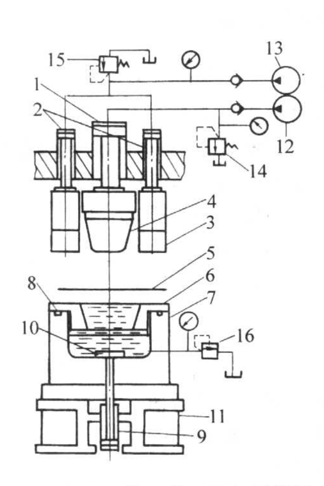


图 7.1-17 对向液压拉深成形设备及模具系统简图

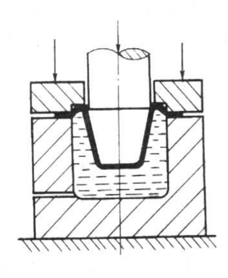
1—内滑块；2—外滑块；3—压边圈；4—拉深凸模；5—板料；6—环形凹模；7—液压室；8—O 形密封圈；9—退料装置；10—卸料板；11—机身；12、13—液压泵；14、15、16—电液控制阀

由于对向液压成形时在凸模侧壁上有摩擦保持效果，再加之在凹模圆角部分有流动液体的润滑，故能产生很好地减小摩擦效果。同时在成形过程中，在与凸模压入方向相反的方向上，坯料一边成形一边被贴紧在凸模上，产生了液体拉深筋的效果，所以能抑制侧壁的起皱和底部的破裂，特别适用于拉深锥形件、抛物线形件。在合适的成形条件下，既可提高成形极限，又能显著减少拉深工序次数，获得较高的零件质量。

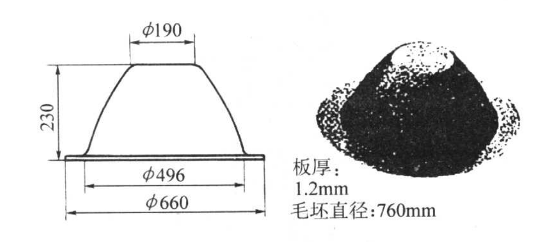
对向液压成形的应用实例如下。

实例一：圆锥形拉深件

圆锥形件的深拉深（图 7.1-18）若采用普通拉深需多道拉深，而采用对向液压拉深则一次即可获得满意结果。



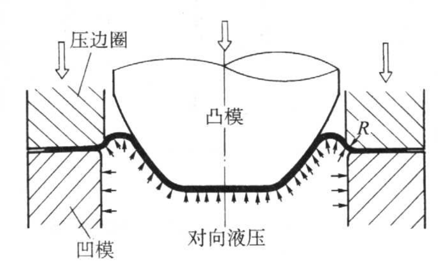
(a) 模具结构图



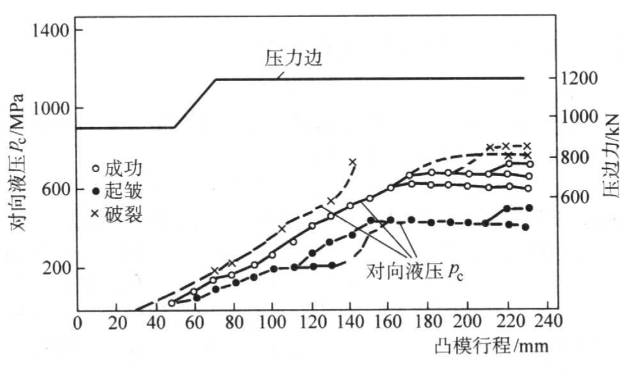
(b) 成形件实例

图 7.1-18 圆锥形件的对向液压拉深

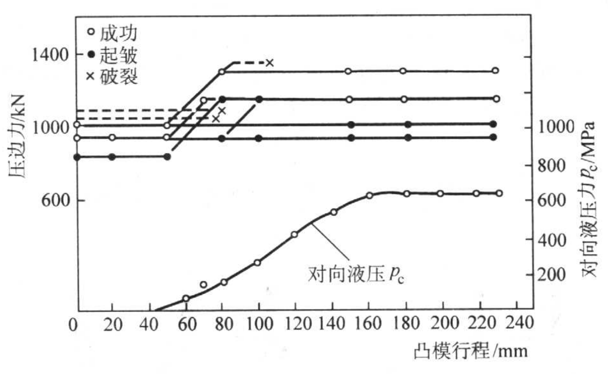
在对向液压拉深初期，凸模下行时因凸模头部间隙较大，受对向液压作用会产生如图 7.1-19 所示的液压拉延筋。这种一周受压缩的拉延筋既能吸收因拉深不足产生的圆锥部的起皱，又能消除凸模顶肩部处的破裂。



(a) 成形初期形成液压拉深筋的状态



(b) 对向液压曲线图



(c) 压边力曲线图

图 7.1-19 成形初期形成液压拉深筋的状态

得到如图 7.1-19 所示的圆锥形零件，成形条件如图 7.1-18 所示。其中图 b 是对向液压和压边力的关系，图中 c 是对向液压条件一定时，压边力的变化对成形条件的影响。

实例二：对向液压高孔翻边

其成形过程如图 7.1-20 所示。图 a 为带孔的板坯放进并压边的情况；图 b 为头部带有 O 形油封的凸模压进液压室并进行拉深，先得到带底孔的圆筒形件；图 c 为在拉深后对向液压，且凸模继续压入，可得到高的孔翻边件。



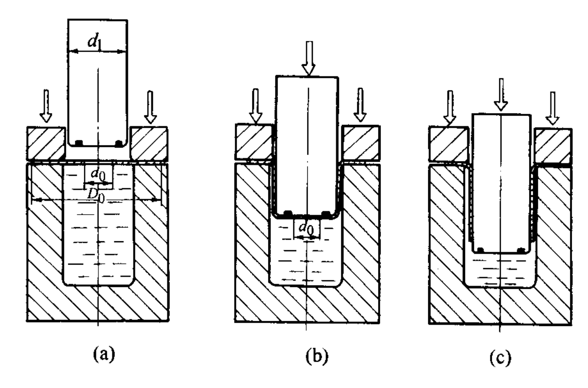


图 7.1-20 对向液压拉深附带高翻孔成形

2 管件的介质成形

2.1 管件的弹性介质成形工艺

(1) 成形原理与特点

就成形原理而言，管件的弹性介质成形主要有自然胀形与轴向压缩胀形两种，现分述之。

1) 自然胀形变形特点。管坯在内压 p 的作用下，零件的成形主要靠管坯壁厚的变薄和轴向自然收缩来完成，变形区主要承受双向拉应力的平面应力状态和两向伸长、一向压缩（变薄）的应变状态（图 7.1-21a）。自然胀形的变形情况较为复杂，其极限变形程度的大小与胀形过程中轴向自然收缩量的大小有关。自然胀形又可分为轴向有收缩和无收缩两种变形方式，同时随着零件的形状和胀形部位的不同，胀形的极限变形程度差别也很大（图 7.1－22)。

① 轴向无收缩的自然胀形。如上图 7.1-22a 所示，这是完全靠管坯壁厚局部变薄而成形的，其变形性质是局部成形。其变形程度用胀形系数 k 表示

$$k = \frac{D_{max}}{D} \tag{7.1-2}$$

式中，D_{max} 为胀形后的最大直径；D 为胀形前的管坯直径。

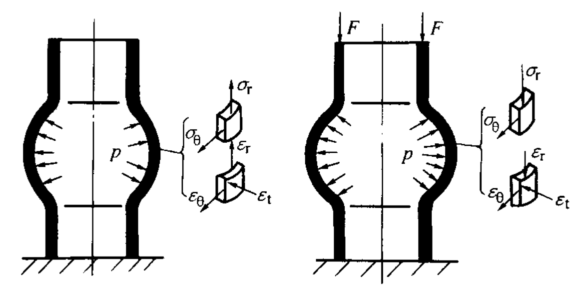


图 7.1-21 管材的弹性介质胀形示意图及其应力应变状态

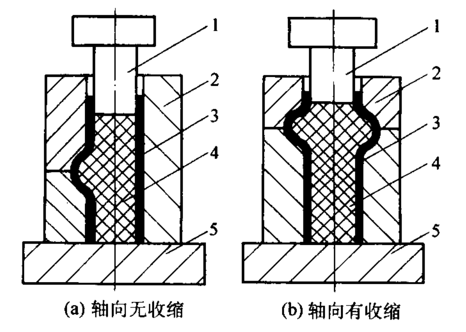


图 7.1-22 自然胀形的两种变形方式

1—压头；2—组合凹模；3—零件；4—橡胶；5—凹模座

其极限胀形系数用 k_{max} 表示

$$k_{max} = \frac{D'_{max}}{D} \tag{7.1-3}$$

式中，D'_{max} 为零件胀破前允许的最大胀形直径。

由于胀形的主要特点是变形区材料受切向和母线方向的拉深，故其极限变形程度受材料允许伸长率 δ 的限制。若胀形管坯切向的许用伸长率为 $\delta_{\theta max}$，则

$$\delta_{\theta max} = \frac{\pi D'_{max} - \pi D}{\pi D} = k_{max} - 1$$

或写成

$$k_{max} = 1 + \delta_{\theta max} \tag{7.1-4}$$

表 7.1-6 列出了一些金属材料自然胀形时的极限胀形系数和切向许用伸长率的实验数值，可供使用时参考。若零件的胀形系数大于表列的极限胀形系数，则应多次胀形，并在胀形工序之间安排退火工序。

表 7.1-6 胀形系数实验值

材 料	厚度/mm	伸长率/%	极限胀形系数 K
高塑性铝合金	0.5	25	1.25
	1.0	28	1.28
纯铝	1.2	32	1.32
	2.0	32	1.32
低碳钢（10、20 钢）	0.5	20	1.20
	1.0	24	1.24
不锈钢（1Cr18Ni9Ti 型）	0.5	26～32	1.26～1.32
	1.0	28～34	1.28～1.34

采用弹性介质自然胀形的模具结构与设计：

由于此类胀形主要用于轴对称类零件，其模具结构首先要考虑取件方便，故通常将刚性凹模作成分块结构。作为弹性凸模的橡胶，既可装于上模，也可装于下模，应视成形零件的特点而定。

图 7.1-23 所示为橡胶凸模装于上模的结构。

图 7.1-24 所示为橡胶装于下模的模具结构。由于该零件的胀形部位处于管坯端部，为使成形件取件方便，故凹模做成整体结构并装于上模。

压制凸筋的橡胶胀形模如图 7.1-25 所示。该模具带有斜楔结构，凹模由左右两半组成，可以在斜楔作用下合拢，上模回程时由弹簧复位，取件方便。

② 轴向压缩的自然胀形。如图 7.1-21b 所示。在胀形部位局部变薄的同时，还伴随着管坯轴向的自然收缩。由于轴向缩短部分的材料补充到成形部分，故其极限变形程度要比轴向无收缩的自然胀形要大些。

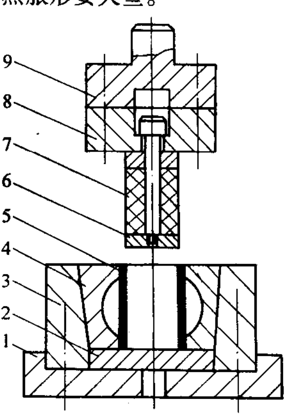


图 7.1-23 橡胶凸模装于上模的胀形模结构

1—下模板；2—顶料板；3—模套；4—分块凹模；5—管坯；6—托板；7—聚氨酯橡胶；8—固定板；9—模柄



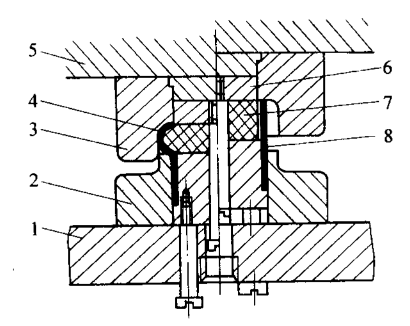


图 7.1-24　橡胶装于下模的胀形模结构
1—下模板；2—定位圈；3—凹模；4—零件；
5—上模板；6—压板；7—橡胶；8—管坯

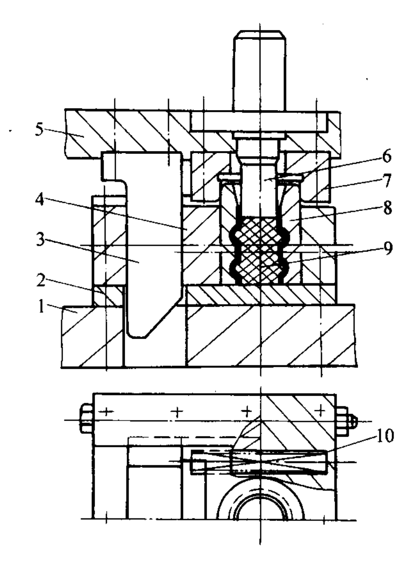


图 7.1-25　带斜楔机构的橡胶凸筋胀形模
1—下模板；2—垫板；3—斜楔；4—滑块；5—上模板；6—压头；
7—合模圈；8—凹模；9—橡胶棒；10—弹簧

③ 胀形区壁厚变化。自然胀形后胀形区壁厚的变化可按体积不变条件计算。当胀形区位于管坯中部时，由于最大变形区的材料沿切向伸长时较难取得母线方向材料的补充，根据体积不变条件：$\pi Dt=\pi D_i t_i$，即

$$t_i=t\frac{D}{D_i} \tag{7.1-5}$$

式中，t 为管坯壁厚；D 为管坯直径；D_i 为胀形后胀形区任一胀形直径；t_i 为胀形后对应于 D_i 处的壁厚。

在最大胀形直径之处，其最小壁厚为

$$t_{min}=t\frac{D}{D_{max}} \tag{7.1-6}$$

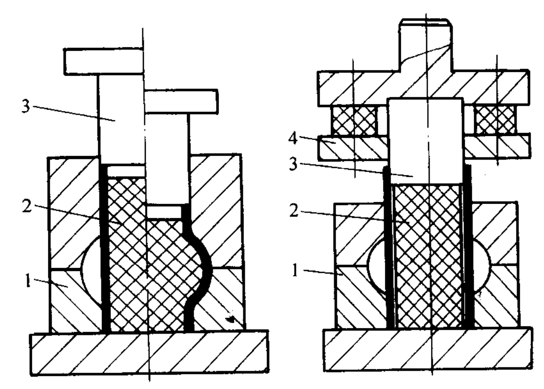
式中，D_{max} 为胀形后的最大直径；t_{min} 为最大胀形直径处的最小壁厚。

当胀形区靠近管坯端部时，其变形区材料的切向伸长较易得到母线方向材料的补充，故其壁厚减薄量相应小一些。

实验研究表明，管材自然胀形的最大减薄量为 $0.3t$ 左右，故对胀形件的壁厚均匀性不能要求太高。

2）轴向压缩胀形变形特点。管坯在内压力 p 和轴向压力 F 的共同作用下的胀形称为轴向压缩胀形（图 7.1-21b）。施加轴向力的结果，不仅使管坯产生轴向压缩变形（塑挤），能补偿胀形区的材料不足，还能改善胀形区的应力应变状态，从而有利于材料的塑性变形并减少胀形区材料的变薄量。控制轴向压力的大小与调节其与内压力的比值是轴向压缩胀形成败的关键。当轴向力足够大时，胀形区的轴向拉应力变为压应力，即变为一拉一压的平面应力状态，而应变状态亦可能变为轴向压缩、径向伸长，而厚向可能不变薄或变薄很少，从而显著提高胀形系数的极限值。

① 轴向压缩胀形的两种方式。根据模具结构的不同，轴向压缩胀形可分为如图 7.1-26 所示的两种变形方式。



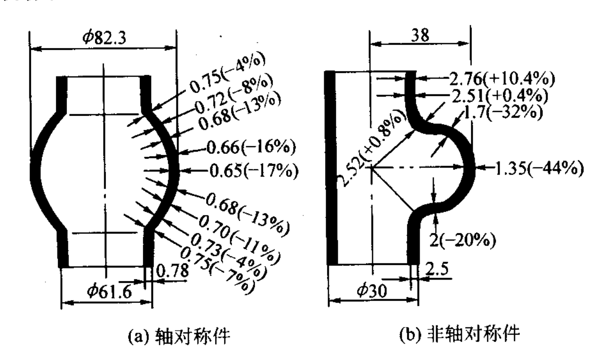
(a) 轴向压力与内压力同时作用　(b) 轴向压力与内压力分别作用

图 7.1-26　轴向压缩胀形的两种变形方式
1—组合凹模；2—聚氨酯橡胶；3—压头；4—压板

图 7.1-26a 为轴向压力与内压力同时作用的变形方式。利用聚氨酯橡胶的体积不可压缩的特点，同时对管坯和橡胶施加压力，将对模具的设计与制造带来很大的方便。图 7.1-26b 是轴向压力与内压力分别作用的变形方式，利用压头和压板分别对橡胶和管坯施加压力，其压力调整较方便，但模具结构稍复杂些。

无论哪种变形方式，均应先使弹性凸模（橡胶）受压力，给管坯以初步的胀形，然后再使管坯与弹性凸模同时压缩成形。而且只有使在管坯上的压力达到材料的流动极限 σ_s 值，弹性凸模的胀形力仅起材料成形的导向和防皱作用，胀形极限变形程度才能显著增大。

② 轴向压缩胀形时胀形区壁厚的变化。因胀形过程中使管坯产生轴向压缩变形，完全或部分地补偿胀形区材料的不足，故可大大减少胀形区的壁厚变薄量。图 7.1-27 所示为轴向压缩胀形的生产实例。图 a 为轴对称胀形件，管坯是 1Cr18Ni9Ti 不锈钢电焊缝管，壁厚 0.78 mm。图 b 是非轴对称件胀形（等径三通管接头），管坯是 20 钢无缝管，壁厚 2.5 mm。胀形后其壁厚的实测值注于图中右边，括号内的百分数是壁厚方向的相对应变。



(a) 轴对称件　(b) 非轴对称件

图 7.1-27　轴向压缩胀形时的管坯壁厚变化实例

由图 7.1-27 中的两例可看出，变形区均会壁厚变薄，且最大胀形变形处变薄最剧。因非轴对称件胀形时轴向压缩变形向胀形区补充材料较为困难，故其减薄量比轴对称件要大，同时其传力区壁厚有明显的增加。

（2）弹性介质胀形的工艺计算及模具设计要点

1）管坯尺寸的确定



① 管坯直径。管坯直径可根据胀形系数 k 确定，即

$$D=\frac{D_{max}}{k}$$

通常可取接近或等于极限胀形系数 k_{max} 来取 k 值。

② 管坯的长度。对于自然胀形，其管坯长度按等长度法计算，其中胀形区的长度 L 应比管件的胀形高度 L_1 增加一收缩量，胀形变形区的管坯长度按下式计算

$$L=L_1(1+c\,\delta_\theta)+B \tag{7.1-7}$$

式中，L 为胀形变形区的管坯长度，mm；L_1 为管件胀形变形区母线的长度，mm；δ_θ 为胀形变形区的切向最大伸长率，$\delta_\theta=\frac{D_{max}-D}{D}$；$c$ 为考虑切向伸长而引起高度缩小的影响系数，$c=0.3\sim0.4$；B 为切边余量，取 $B=5\sim15$ mm，对于形状不对称的复杂胀形件 B 取大值。

管坯的总长度为胀形变形区所需长度与直筒部分长度之和，即

$$L_0=L+L_{直} \tag{7.1-8}$$

式中，L_0 为管坯总长度；$L_{直}$ 为管件直筒部分的长度。

对于轴向压缩胀形时管坯长度按体积相等原则计算（图7.1-28）。由于在管坯两端施加轴向压力，使管坯产生轴向压缩变形以补偿胀形变形区材料的不足，故管坯长度有所增加。

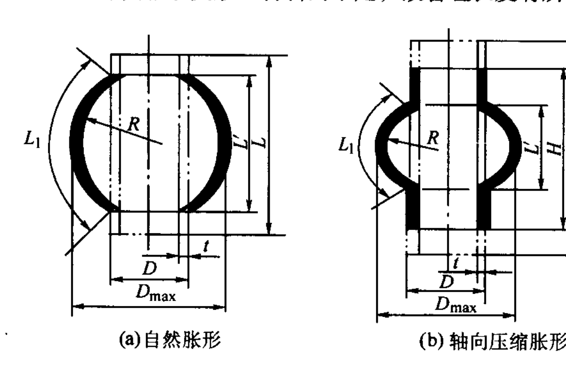


图 7.1-28　轴向压缩胀形变形区管坯尺寸

设管坯体积为 $V_{坯}$，管件体积为 $V_{件}$，即

$$V_{坯}=\frac{\pi}{4}(D^2-d^2)L_0 \tag{7.1-9}$$

$$V_{件}=V_1+V_2 \tag{7.1-10}$$

根据体积相等原则，管坯总长度为

$$L_0=\frac{4(V_1+V_2)}{\pi(D^2-d^2)}+\Delta l \tag{7.1-11}$$

式中，L_0 为管坯总长度，mm；D 为管坯外径，mm；d 为管坯内径，mm；V_1 为管坯胀形变形区的体积，mm³；V_2 为管件直筒部分的体积，mm³；Δl 为切边余量，一般取 $\Delta l=5\sim10$ mm。

2）胀形力。采用聚氨酯橡胶胀形时，除需要对管坯径向施加足够的单位压力外，还需克服橡胶与管坯之间的摩擦力，故橡胶胀形的总压力应为橡胶胀形力与摩擦力之和。

设橡胶胀形的单位压力为 p，则其胀形力为

$$F=pA \tag{7.1-12}$$

式中，F 为橡胶胀形力，N；p 为橡胶单位压力，MPa，其中 $p=(\frac{t}{r_{max}}+\frac{t}{R})\sigma_b$；$A$ 为橡胶块的投影面积，mm²；t 为管坯厚度，mm；R 为胀形件母线曲率半径，mm；r_{max} 为胀形后的最大曲率半径，mm；σ_b 为材料的抗拉强度，MPa。

橡胶与管坯之间的摩擦力为

$$F_1=\mu pA_1 \tag{7.1-13}$$

式中，F_1 为橡胶与管坯之间的摩擦力，N；μ 为橡胶与管壁间的摩擦系数，通常取 $\mu=0.6\sim0.8$；A_1 为摩擦力作用的表面积，mm²。

于是，橡胶胀形的总压力 F_0 为

$$F_0=F+F_1=pA+\mu pA_1 \tag{7.1-14}$$

3）橡胶模块（弹性凸模）。橡胶模块的作用是承受压力机的压力并通过其变形将压力传递到管坯上，使管坯按预定的要求发生变形。在胀形过程中聚氨酯橡胶块受压后其形状首先发生变化，完全充满由坯料和冲头组成的型腔。在冲头进一步动作时，橡胶块的体积受到压缩，压力急剧增大而使坯料发生塑性变形。之后橡胶块便随着坯料一起变形（贴紧），体积不再变化，从而保持基本均匀稳定的压力场。因此要求橡胶模块必须具有一定的强度、硬度和弹性，而且还要在封闭状态下工作并产生胀形所需的足够压力。

① 橡胶模块尺寸的确定。根据胀形件的形状及尺寸特征决定橡胶模块的尺寸后，即可确定其径向和高度尺寸。其径向尺寸应考虑经多次反复变形而产生少量永久变形后仍易于放进和取出为原则。形状较简单的胀形件，所采用的圆柱形橡胶模块的尺寸可参照图 7.1-29 来确定。

当采用聚氨酯橡胶模块时，其直径按下式确定。

$$d_0=d-(0.5\sim1)\ \text{mm} \tag{7.1-15}$$

当采用天然橡胶模块时，由于其永久变形量较大，可按下式确定其直径。

$$d_0=0.985d-0.3t \tag{7.1-16}$$

橡胶模块的高度尺寸按体积相等原则计算，在不考虑橡胶压缩后体积变化的情况下，其高度计算如下。

$$H_0=L\frac{d^2}{d_0{}^2} \tag{7.1-17}$$

② 橡胶的压缩量与硬度的选择。橡胶的压缩量和硬度对零件的胀形精度影响很大，最小压缩量一般在 10% 以上时才能确保零件在开始胀形时具有所需的预压力。但压缩量也不能过大，最大不能超过 35%，否则橡胶会很快损坏，寿命低。一般来说，对于形状简单且成形曲面较圆滑的胀形件，可选用邵氏硬度为 60～70A 的聚氨酯橡胶；但当成形零件具有小的圆弧或局部尖角，并要求成形后外轮廓清晰时，则应采用较硬的橡胶。若成形的同时，还要求有冲孔等工序时，则最好用邵氏硬度为 70～80A 的聚氨酯橡胶。

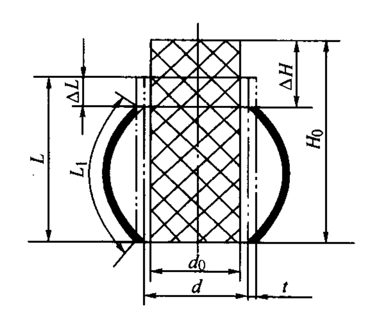


图 7.1-29　圆柱形橡胶模块的尺寸

d_0—橡胶模块的直径；H_0—橡胶模块的高度；
ΔH—橡胶压缩量；d—管坯内径；t—管坯壁厚；
L—胀形变形区的管坯长度；ΔL—管坯自然收缩量；
L_1—管件胀形变形区的母线长度

（3）应用实例及模具结构

1）自行车中接头的轴向压缩胀形。自行车中接头是带支管零件中的典型件，是自行车上的主要受力构件。该零件的传统工艺是用钢板经多道冲压成形后，再用弯曲、焊接工艺等制成，工艺繁琐、制造成本高、生产率低，而且零件质量也得不到保证。



近年来，国内外普遍采用聚氨酯橡胶为介质，将卷焊而成的钢管，采用轴向压缩胀形方法直接成形中接头，具体工艺和基本尺寸如图 7.1-30 所示。其主要工序有：管坯备料（切断、内孔倒角），磷化、皂化处理，胀形，冲或钻四个支管孔，退火，用钢球翻支管孔，两端镗孔、车端面，两端挤压螺纹孔。其中胀形是整个工艺过程中的关键。下面仅就胀形工艺中的模具结构及其有关工艺分析、计算进行介绍。

① 模具结构及工作原理。中接头橡胶胀形模具如图 7.1-31 所示。由于中接头成形部位不对称，且变形量又大，故必须采用轴向压缩胀形工艺，以补给成形部位材料的不足。同时，为了解决单向压缩时因受摩擦的影响而沿轴向压力分布不均匀的问题，故采用了对管坯两端同步施加轴向压力的模具结构。另外，该模具与薄壁圆筒件橡胶胀形模具（图 7.1-29）相比，施加在管坯内的橡胶胀形力和管坯端面的轴向压力则是同时进行的。

模具工作时，首先把橡胶棒 10 放入管坯中，并与管坯一起置入凹模 12。为了便于取件，凹模由三瓣组合而成。当压力机滑块下行时，先由压圈 11 将三瓣凹模合拢。滑块继续下行时，在橡胶垫 8 的弹压力作用下，通过外套 6 和压圈锁紧凹模。橡胶垫的弹压力愈大，对凹模的锁紧效果也就愈好。当上凸模 9 接触橡胶棒，且紧接着接触管坯上端口的同时，下凸模 5 也在左右顶杆 7、压柱 3、承压块 2、杠杆 1、压头 14 及承压柱 13 的作用下向上运动，与橡胶棒和管坯下端口接触。这样，上、下凸模同时以相等的压力作用于橡胶棒及管坯，将管坯推向凹模内腔而成形。当压力机滑块回程，上、下压力卸除后，橡胶棒即恢复原状，压柱、机杆及承压柱等也恢复到原始位置。当滑块回程到上止点时，组合凹模自动打开（用气动、液动或机动），即可取出成形件。

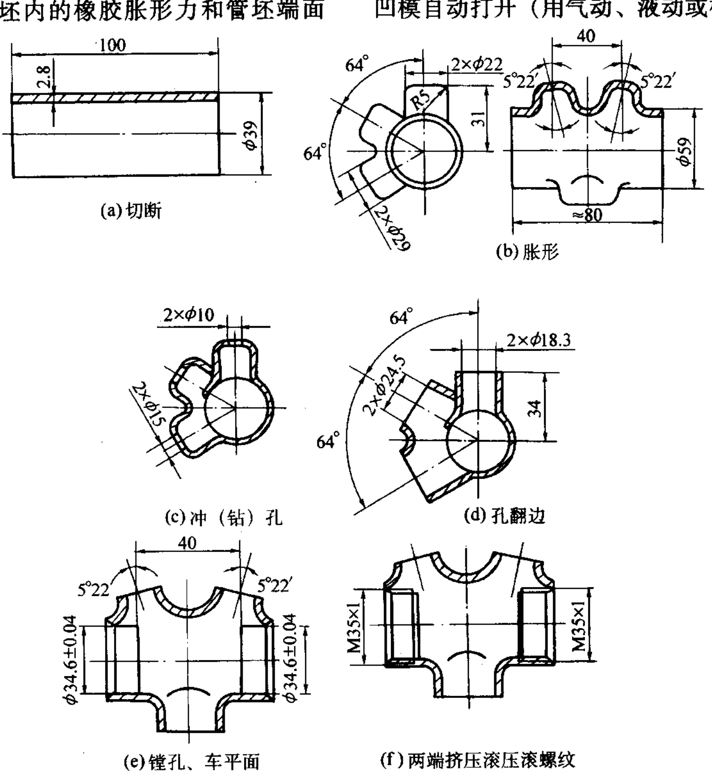


图 7.1-30 中接头的加工工序简图

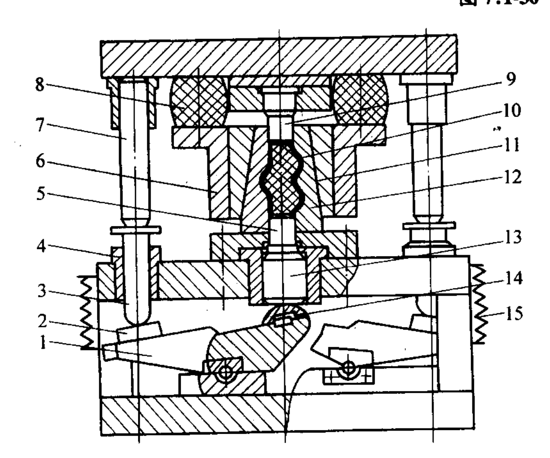


图 7.1-31 中接头的橡胶胀形模具简图

1—杠杆；2—承压块；3—压柱；4—导向套；5—下凸模；6—外套圈；7—顶杆；8—橡胶垫；9—上凸模；10—聚氨酯橡胶棒；11—压圈；12—凹模；13—承压柱；14—压头；15—弹簧

应当特别指出，在中接头的橡胶胀形过程中，由于金属的局部变形量大，不仅有剧烈的轴向流动来补充成形区材料的不足，而且还有由非成形区向成形区的周向（横向）流动，因此变形较为复杂。由于轴向压缩胀形主要是通过金属的轴向流动来补充成形区材料的不足，因而要求材料补充的速度应当与管坯在承受足够内压时的径向变形速度相适应，否则易引起质量缺陷。若材料补充过慢而内压力过大，则胀形部位的壁厚易变薄，甚至导致破裂；若材料补充过快而内压力较小，则容易在管坯中部引起凹坑、折皱等缺陷。

② 模具设计要点。中接头的橡胶胀形模具设计中应特别注意如下几点。

a) 凹模设计要点。由于中接头胀出的四个凸台是在圆周的三个不同方向，故凹模应沿轴向分割，由三瓣组合而成，才能在胀形后取出零件。同时，为保证凹模正常工作，凹模外形圆锥面的斜角 α（图 7.1-32）一般应稍大于摩擦角，以便让凹模与压圈圆锥面的接触既不能自锁，又必须保证在一定的轴向压力作用下不致使凹模在内壁受压工作时张开。目前，国内许多自行车厂多采用 $\alpha \approx 6°$。

b) 凸模设计要点 上、下凸模工作端的几何形状如图



7.1-33 所示，这是根据中接头轴向压缩胀形过程的工作要求而设计的。即使凸模的小阶梯直径 d 先进入管坯内压缩橡胶棒，直至橡胶充满管坯内腔并使胀形区金属在内压力作用下达到初始塑性状态时，大阶梯直径 D 的台肩才接触管坯端面，开始对管坯施加轴向压力，推动金属向凹模空腔流动。这样，使胀形区金属材料得到及时的补充，变薄现象减少，变形程度得以提高。图中 d 与 D 之公称尺寸分别取管坯内径与外径的公称尺寸，圆角一般可取 $R=2\sim4$ mm，突出部分的圆柱体长度取 $l=4\sim8$ mm 为宜。

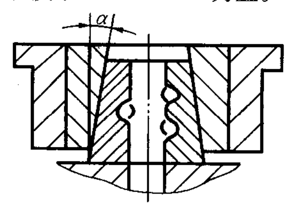


图 7.1-32　凹模圆锥面斜角 α

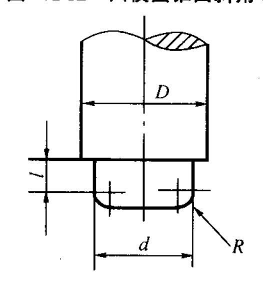


图 7.1-33　凸模工作端的几何形状及尺寸

c) 橡胶棒材质及尺寸确定　由于胀形过程中变形较大，所需单位压力也较大，生产中一般选用邵氏硬度为 75A 的聚氨酯橡胶，其寿命可达 1 000 件左右。生产中也有采用普通橡胶的，但寿命较低，且橡胶单位压力也较小。橡胶棒的直径一般选取较管坯内径小 1 mm 左右，其长度尺寸应视管坯内腔的容积而定。本例的聚氨酯橡胶棒尺寸为 $\phi32$ mm × 100 mm。

③ 成形力。中接头轴向压缩胀形时的受力分析如图 7.1-34 所示。由橡胶胀形过程可知，封闭在管坯内的橡胶介质产生的单位内压力 p 将随着上下凸模的相向运动逐渐增加。从理论上讲，具有良好弹性的固体介质是不可压缩（体积不变）的，当轴向力增加到一定程度后，橡胶棒与管坯之间就没有相对运动，此时可看成一个统一的塑性变形体。随着成形压力（即橡胶胀形压力 F 与施加在管坯端面的轴向压力 Q 之和）的增加，管坯径向增大，并紧贴凹模侧壁，近使材料流向凹模空腔形成支管。同时，由于管坯内部有内压力 p 存在，管坯变形时对凹模侧壁必然产生正压力；故当管坯沿凹模侧壁进入凹模空腔形成支管时，有阻止金属流动的摩擦力 F_1 存在。此外，由于凹模由三瓣组合而成，胀形过程中需用锥面压圈将凹模箍紧，压圈力 F_2 由成形装置的橡胶垫提供。所以，中接头轴向压缩胀形时所需的压力机总压力为

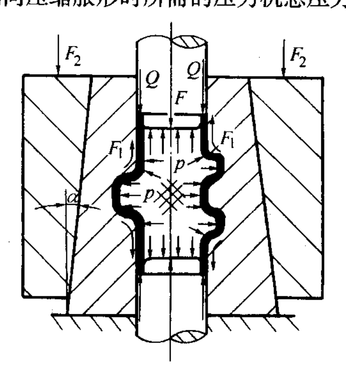


图 7.1-34　中接头轴向压缩胀形受力分析图

$$F_0 = F + Q + F_1 + F_2 \qquad (7.1\text{-}18)$$

式中，F 为橡胶胀形压力，N；Q 为施加在管坯端面上的轴向压力，N；F_1 为摩擦阻力，N，可按下式近似确定

$$F_1 = \mu A_1 p \qquad (7.1\text{-}19)$$

F_2 为压圈力，N，它是由压力机滑块通过成形装置的橡胶垫施加在压圈上的力，应与凹模传递给压圈再转换为轴向的反力相平衡，即

$$F_2 = A_2 p \tan\alpha \qquad (7.1\text{-}20)$$

在式（7.1-19）和式（7.1-20）中：p 为橡胶单位内压力，MPa；μ 为管坯与凹模侧壁的摩擦系数；A_1 为管坯侧壁无支管的圆柱表面积，mm²；A_2 为管坯圆柱表面积，mm²；α 为凹模外锥角，(°)。

(4) 弹性介质复合胀形工艺及其应用

复合胀形是在前述自然胀形和轴向压缩胀形基础上发展起来的新工艺，近年来已推广应用于具有广泛用途的三通、四通和五通管接头的成形，具有生产率高、产品质量好及成本低等优点。

1) 成形原理。以等径三通管接头为例说明。如图 7.1-35 所示，在轴向压缩胀形的同时，为了改善支管端部的应力、应变状态，以提高变形程度和减小变薄量，在支管端部再施加径向反压力 F_3，故可称其为“内压—轴压—径向反压复合胀形”。在此胀形过程中，由于径向反压力的作用，使胀形区最大变形处的应力状态得到明显改善，使金属处于较高的静水压力作用下产生变形，从而为发挥材料的塑性提供更加有利的变形条件，显著提高成形极限，并有效地防止胀破。

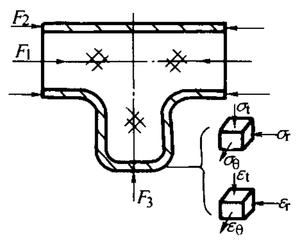


图 7.1-35　复合胀形工艺变形特点及受力状态

2) 模具结构及工艺要点。三通管接头复合胀形的模具示意图如图 7.1-36 所示，它主要由两个凸模 3 和沿轴向对分的凹模 1、5 及刚性反压块 6 组成。其凸模做成阶梯状，小的阶梯直径段进入管坯内对橡胶棒施加压力，大阶梯直径与凹模空腔滑动配合，其环形端面对管坯两端同步施加轴向压力。反压块位于凹模的支管成形型腔中，利用液压机顶出缸对胀出的支管端部施加反压力。成形是在国产 YB32—100A 液压机上进行的。管坯材料为 20 钢无缝管，外径 $\phi30$ mm，壁厚 2.5 mm。备料后，需要对管坯进行酸洗与磷化、皂化处理。

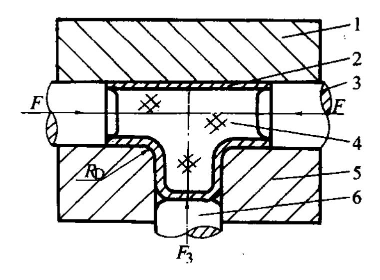


图 7.1-36　三通管接头复合胀形模示意图
1—上半凹模；2—管坯；3—凸模；
4—聚氨酯橡胶棒；5—下半凹模；6—反压块

对三通管接头复合胀形时，为保证产品质量，应注意以

下工艺要点。

① 施加的反压力大小应当合理。反压力过小，不能有效地抑制壁厚变薄；反压力过大，不仅要增加轴向压力 F_2，还会导致凹模圆角处金属壁厚显著增加，甚至会在大的压缩应力作用下产生失稳而起皱折，故应在试模时进行调整。

② 为了减少弯曲变形抗力，在满足产品使用要求的情况下，尽量增大凹模过渡圆角半径，以使金属易于流入支管型腔。

③ 必须对管坯外表面进行良好润滑，能保证在橡胶内压作用下仍保持好的润滑，从而减小摩擦力。相反，管坯内壁则应提高摩擦作用，以减少支管变薄。

④ 所用聚氨酯橡胶棒硬度取邵氏 60 ~ 70 A 为宜。

⑤ 为使橡胶的作用尽量集中作用于支管成形处，可采用如图 7.1-37 所示的小端带斜面的凸模结构。

2.2 管件的液体介质成形工艺及工装设计

(1) 成形原理与特点

液压成（胀）形是利用液体（水或油）代替刚性凸模或弹性体凸模的作用，使管坯在液体内压力作用下产生径向扩张的成形方法，它也属于软模成形的范畴。液压胀形与其他胀形（如刚性模胀形，弹性介质胀形）相比具有如下优点。

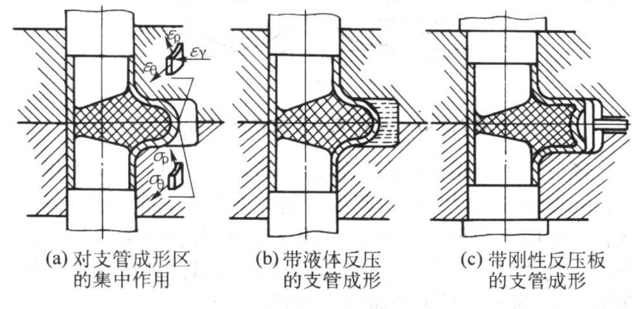


图 7.1-37　具有斜端面凸模的复合胀形模结构

1）由于是在无摩擦状态下成形，传力均匀，能使材料在最佳受力条件下变形。

2）工艺过程简便，成本低。

3）零件表面光滑，质量好。

缺点是生产效率低，胀形模具或装置需要严格密封，以防液体泄漏。

液压胀形多用于生产表面质量和精度要求较高的复杂形状零件。由于液体压力便于控制，特别适用于大、中型零件成形，一般胀形直径可达 200 ~ 1 500 mm 左右。根据胀形零件的几何形状特征可将管材液压胀形分为直长轴类液压胀形和具有弯曲中心线类液压胀形两大类。下面分别予以介绍其工艺特征与工装设计。

(2) 直长轴类零件的液压胀形工艺与工装设计

1）胀形工艺过程及模具结构原理。对于初始管坯具有直长轴的一族零件（图 7.1-38），其胀形过程是直接通过施

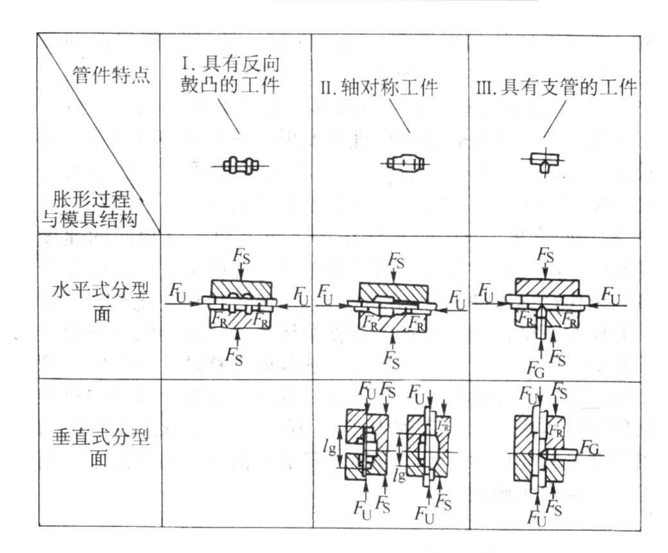


图 7.1-38　直长轴类管件的液压胀形过程及分类

② 带有支管或局部错移的管件胀形。如图 7.1-38 所示的第Ⅲ类管件成形时，除了施加轴向压缩力 F_U、F_R 之外，还应通过侧压装置施加径向力 F_G，用复合胀形法使管坯在复合作用下在不对称的凹模型腔中形成支管或局部错移。因此其模具结构较轴对称类件的要复杂些，工艺过程的控制与调节也较复杂。

根据所用设备，上述两类胀形模具结构可以采用水平分模面（卧式胀形）与垂直分模面（立式胀形）两种形式。

2）直长轴类管件胀形过程中的塑性失稳及成形缺陷

① 屈曲失稳。在胀形过程开始时，若施加的轴向压缩力过高，就会发生如图 7.1-39a 所示的屈曲失稳。如不进行调节，则屈曲失稳会持续发生，并最终遍及而导致触发状态，这势必影响到整个成形过程。此时应采取减小管坯自由段的长度，来防止因管坯受轴向力施压管坯的横截面系数增加过剧，而引起成对镦挤而出现的屈曲。

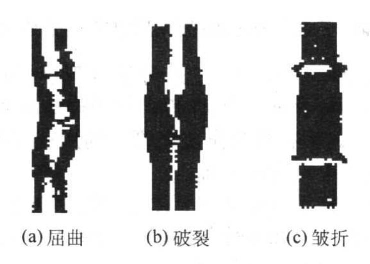


图 7.1-39　直长轴类管件液压胀形时典型的塑性失稳形式

② 破裂（图 7.1-39b）。胀形中由于内高压的增加使胀形系数（d_ϕ/d_0）超过 1.4 时，就有发生破裂的危险。破裂过程是由于管壁的局部缩颈触发的。在胀形过程中，内压过高会在胀形部位的管壁上形成特殊的颈缩，并伴随有微裂



离，并使管坯的相对壁厚 $t/d_0>0.05$，便可控制屈曲的发生；胀形比过大时应分步胀形，即可避免破裂。

3）多通管液体介质复合胀形工艺及装置。图 7.1-40 为三通管液体介质复合胀形原理及变形区应力状态分布图。将长度为 $2l_0$、直径为 $2R$、壁厚为 S_0 的原始管坯，置于可分式凹模型腔中。在复合胀形时，管坯受内压 p，轴向挤压力 Q_1 和侧向支承力 Q_2 的复合作用。两个冲头以相同的速度同时向中间移动并挤压，结果使管坯中部的金属受迫向支管型腔内作径向流动，开始形成鼓包。由于材料硬化和连续挤压的作用使塑性变形区扩展至整个坯料，从而导致坯料沿全长管壁增厚。随着两个挤压冲头继续向内移动，支管的长度 b 不断增加，直至增加到所需长度为止。支管端部由中央控制模镶块所施加反向支承力 Q_2，其作用在于减少甚至抵消支管部分的拉应力，尽可能防止形成三向压应力状态，从而防止支管发生破裂。

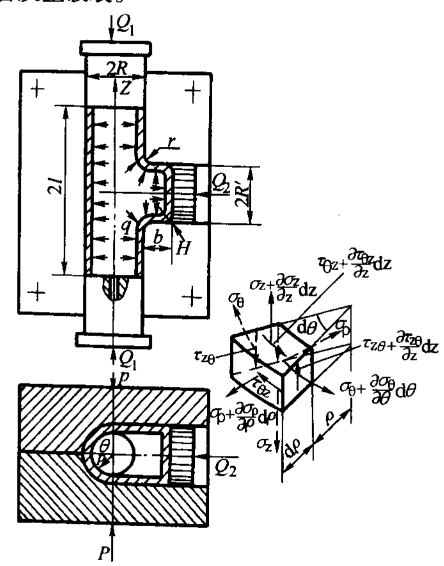


图 7.1-40　三通管液压胀形原理及变形区的应力状态

利用圆柱坐标系 ρ、θ、z 来分析变形区的应力与应变状态，如图 7.1-40 所示。忽略坯料与凹模壁间摩擦引起的切应力 $\tau_{\rho\theta}$、$\tau_{z\theta}$；坯料被视作薄壁管。利用连续原理可建立与变形速度相关的动力学方程。

先在圆柱坐标系中建立单元体受力的平衡方程。再将动力学方程、平衡方程和塑性条件联立求解可得应变和应力表达方式。其中应力表达式分别为

$$\sigma_\rho=-p-\frac{\sigma_s(m-1)\ln\dfrac{\rho}{R-S_1}}{\sqrt{3(m+1)}}$$

$$\sigma_\theta=-p+\frac{\sigma_s(m-1)}{\sqrt{3(m+1)}}\left(\ln\frac{\rho}{R-S_1}+1\right)$$

$$\sigma_Z=-p-\frac{\sigma_s(2+m)+(1+m)\ln\dfrac{\rho}{R-S_1}}{\sqrt{3(m+1)}} \qquad (7.1\text{-}21)$$

$$\tau_{\theta Z}=-\frac{\sigma_s\eta\sin\theta sh\dfrac{z}{R}}{\sqrt{3(m+1)}\left(\cos\theta ch\dfrac{z}{R}\right)}$$

式中
$$m=\frac{\eta\left(1+\cos\theta sh\dfrac{z}{R}+\eta\right)}{\left(\cos\theta+ch\dfrac{z}{R}\right)^2}$$

η 为系数，考虑因内压 p 和支管端单位支承压力 p_2 的差别，而导致在支管侧壁上的应力的影响。

$$\eta=\frac{2a^2\sqrt{4-a^2}}{2+\sqrt{4-a^2}}\left\{p\pm\frac{(p-p_2)R'\sqrt{3}}{2S_1}\frac{}{\sigma_s}+\frac{2\sqrt{4-a^2}-1}{\sqrt{4-a}}-\frac{r}{R'}(2-a)\right\}$$

式中，R 为坯料外半径；R'为支管外半径；r 为支管与主管相交处半径；s_1 为壁原；a 为系数，$a=\dfrac{R'+r}{R+r}$；p_2 为支管端部支承力，$p_2=\dfrac{Q_2}{\pi(R')^2}$；$\sigma_s$ 为材料屈服应力。

由方程组（7.1-21）可以看出，应力分量不是随圆柱坐标系统不变的，而是随着复合胀形过程的变化而变化的。图 7.1-41 表示了当支管长度 $b=2R'$时三通管侧表面沿工件轴线的应力分布曲线。图示曲线表明：由支管引起的应力波动，在离开 $z=0$ 的横向对称面（2.5～3）R'处消失。

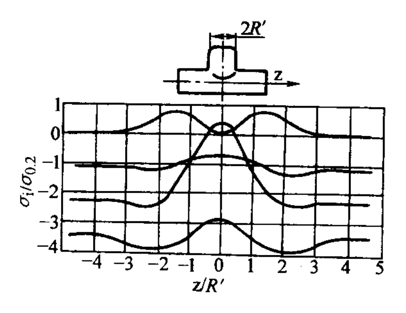


图 7.1-41　支管成形产生的应力变化

经分析不难得出：在主管的端部 σ_z、σ_ρ 和 σ_θ 均为压应力，σ_z 是由挤压力 Q_1 引起的，其方向与坯料的轴线平行。坯料外表面承受径向应力 σ_ρ 的作用，而内表面承受均匀的内压 p 的作用。因受凹模刚性模壁的限制，主管端部的切向变形 e_θ 为零，属于平面应变状态，故有

$$\sigma_\theta=\frac{1}{2}(\sigma_\rho+\sigma_z)$$

① 工艺参数的计算

a）壁厚的计算。在复合胀形过程中，主管壁厚将变厚，即壁厚 S_1 将大于原始壁厚 S_0；S_1 可按下式计算

$$S_1=S_0\left(\frac{l_0+\eta R}{l+\eta R}\right) \qquad (7.1\text{-}22a)$$

式中，l_0、l 为原始管坯和三通管长的一半，或采用下式计算；

$$S_1=S_0\left(l+k\frac{b}{R'}\right) \qquad (7.1\text{-}22b)$$

式中，b 为支管长度；R'为支管外半径；K 为系数，对于低碳钢取 0.14～0.16。

b）支管长度的计算。在塑挤胀形过程中，支管长度 b 与主管的轴向压缩量 Δh 之间存在近似关系（图 7.1-42a）：

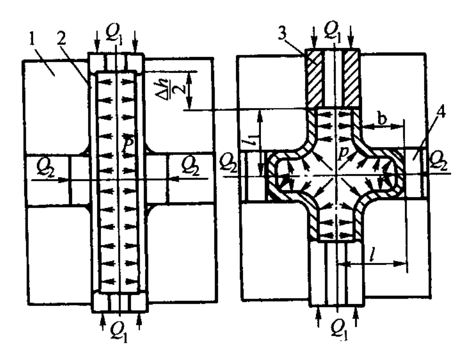
$$b=K\frac{\Delta h}{n} \qquad (7.1\text{-}23)$$

式中，K 为比例系数，二通、四通管的比例关系分别如图 7.1-42b 中曲线 1 和 2 所示；n 为支管数量。

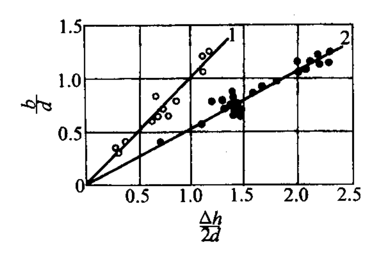
支管长度 b 与主管两端的压缩量 Δh 之间的关系，还可利用图 7.1-43 中的曲线求得，图中曲线 1 为单个支管的关系，曲线 2 为异侧双支管的关系。

利用式（7.1-23）或图 7.1-42 中曲线关系，可以确定当需要成形长度为 b 的支管时所需的主管的压缩量，因此，也就确定了原始管坯的长度 l_0。

c）最小内压的确定。最小的液体压力 p_{min} 可利用它同材料的屈服应力 σ_s、管坯壁厚 S_0 和支管长度 b 间的经验关



(a) 复合液压胀形系统



(b) 比例关系曲线

图 7.1-42　四通管接头的复合液压胀形

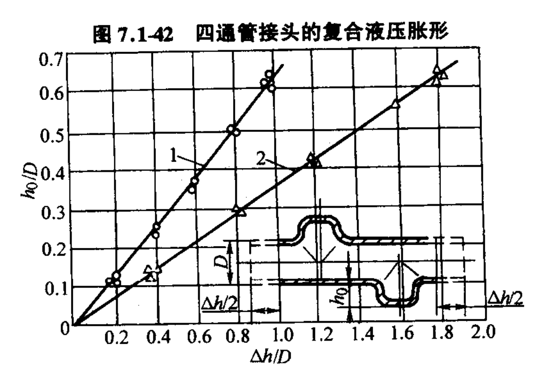


图 7.1-43　支管长度 b 与主管压缩量 Δh 之间的关系曲线

1—单个支管的关系曲线；2—双支管的关系曲线

系确定：

$$p_{\min}=\frac{2A(11.5k\frac{b}{R'})^n(1+k\frac{b}{R'})S_0}{2R'-S_0} \qquad (7.1\text{-}24)$$

式中，A、n 为材料的近似硬化曲线参数；k 为系数，对于低碳钢取 0.14 ~ 0.16。

d) 轴向挤压力 Q_1 的计算。轴向挤压力 Q_1 包含克服管坯变形，由胀形液体所产生的内压 p、管坯和凹模间的摩擦阻力等。如前所述，在接近冲头的端部，可假设为平面变形，因此，挤压力 Q_1 可采用下式计算

$$Q_1=\pi\left\{p\frac{d^2}{4}+1.15\sigma_s\frac{3}{4}(d-S_1)S_1+\frac{d^2}{8}\ln\frac{d}{d-2S_1}+\mu d(l-\frac{d'}{2})(p+\frac{1.15\sigma_S S_1}{d-2S_1})\right\} \qquad (7.1\text{-}25)$$

为预防支管破裂而施加的侧向支承力 Q_2 可按下式计算

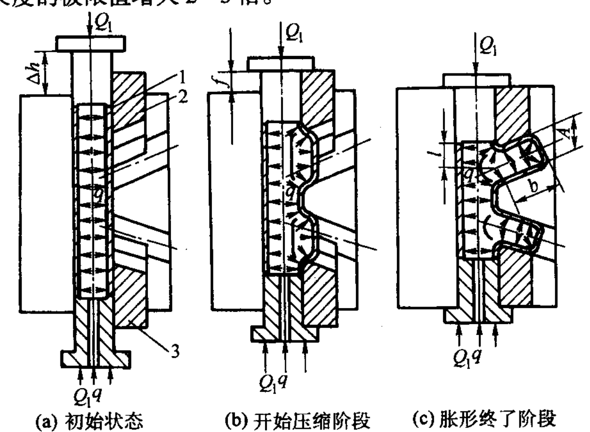
$$Q_2=\pi q(\frac{2R'-S_0}{2}-\frac{\sigma_b S_0}{p})^2 \qquad (7.1\text{-}26)$$

为防止组合凹模张开而所需的压紧力 P 可按下式计算

$$P=p+\frac{1.15\sigma_s S_1}{d-2S_1}(2l-d')d+qd'(d+b) \qquad (7.1\text{-}27)$$

式中，d、d'为管坯和支管外径；l 为三通管部长度的一半；σ_s 为材料的流动应力；S_1 为三通管件壁厚；μ 为摩擦系数，取 0.05 ~ 0.1。

② 同侧双支管液压复合胀形。如图 7.1-44 所示，在凹模上设计了可动镶块 2 和 3。工作开始时，管坯 1 置于凹模型腔中，可动镶块 2、3 分别被顶向两端，如图 7.1-44a 所示；管坯在两个冲头挤压力和内部液体压力 p 的作用下，在两个支管型腔处形成椭圆形鼓包，椭圆形长轴与主管轴线一致，如图 7.1-44b 所示。在两个冲头继续挤压时，迫使镶块 2、3 一起向前移动，镶块 2 和 3 沿椭圆形长轴方向压缩鼓包，支管横向尺寸减小，依靠金属体积的转移而使支管长度增加，如图 7.1-44c 所示。利用这种模具结构，可使支管长度的极限值增大 2 ~ 3 倍。



(a) 初始状态　(b) 开始压缩阶段　(c) 胀形终了阶段

图 7.1-44　同侧双支管复合液压胀形系统

在这样的复合胀形系统中，支管长度的极限值可达到支管管径的 1 ~ 1.2 倍，即可达到复合胀形三通时支管的长度。支管长度的进一步增加，将受到管坯起皱等失稳的限制。

镶块移动距离 f 影响到支管的最终高度，f 越大，支管越长。然而 f 值增大将导致材料失稳。经验表明，镶块移动距离 f 一般为轴向压缩量 Δh 的 0.6 ~ 0.7 倍。由经验公式可确定管坯一端的压缩量为

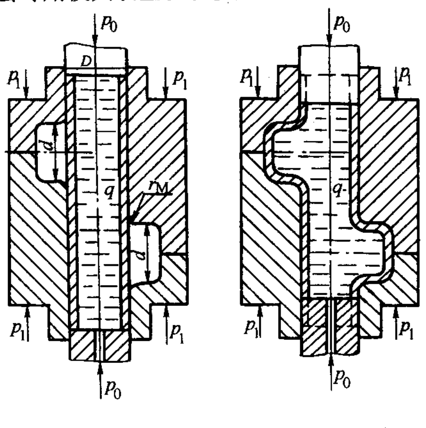
$$\Delta h=1.55b+(l-0.75A)\frac{(d-S_1)S_1}{(d-S_0)S_0} \qquad (7.1\text{-}28)$$

式中，S_0、S_1 为分别为管坯和制件端部壁厚，其余符号如图 7.1-43 所示。

③ 液压复合胀形模具及设备。使用液压复合胀形模具及设备有两种途径，一种是设计专用的模具装置与通用压力机配套使用；另一种是设计专用压力机。前者适合于多品种、中小批量生产，后者适合于少品种、大批量生产。

a) 专用模具装置与通用压力机配套使用。图 7.1-45 为异形四通液压复合胀形工作原理及基本模具结构。图 7.1-45a 为初始状态，图 7.1-45b 为结束状态。

图 7.1-46 为包括模具、液压、空气增压器及控制系统在内的整套专用模具装置。该模具装置与液压机配套使用。



(a) 初始状态　(b) 结束状态

图 7.1-45　异形四通复合液压胀形



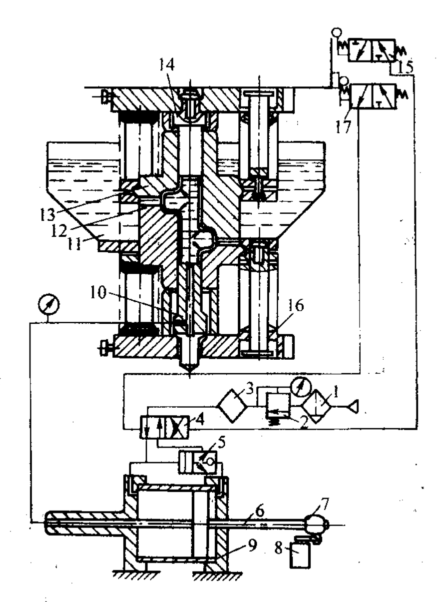


图 7.1-46 异形四通管复合液压胀形的模具、液压及空气增压系统
1—过滤器；2—压力调节阀；3—喷雾器；
4—分配器；5—反向阀；6—活塞杆；7—凸轮；
8—阀；9—增压缸；10、14—冲头；11—油箱；12—凹模型腔；
13—主凹模；15—中断器；16—碟形弹簧；17—开关

其工作原理及工艺过程如下：管坯置于凹模型腔 12 中，并由油箱 11 向管坯内注满油液。当压力机滑块向下时，上凹模 13 同下凹模 12 闭合，并压缩下面的碟形弹簧 16，保证上下凹模必要的合模力，冲头 10 和 14 密封管坯中的油液。此时，开关 17 动作，压缩空气经过过滤器 1、压力调节阀 2、喷雾器 3 和空气分配器 4 进入增压缸 9 的右腔，推动活塞向左移动，保证管坯内开始的液体压力，压力大小通过阀 2 调节。

当压力机滑块继续下行时，管坯被轴向压缩，使管坯体积减少而导致管坯内排出部分油液，排出的压力油进入增压器左腔而使活塞右移，使增压缸右腔中的压缩空气被压缩（反向阀 5 此时关闭）。工件空腔中液体压力按照下面的关系式变化

$$p_i = p_0 \frac{V_0}{V_i}$$

式中，V_0、p_0 为管坯空腔初始体积压力；V_i、p_i 为工件空腔内瞬时体积和压力。

p_0 采用圆形管承载特性表达式确定

$$p_0 = \beta\sigma_s \ln\left(1 + \frac{S}{R}\right)$$

式中，β 为考虑平均主应力影响系数；σ_s 为材料屈服强度；R、S 为分别为管坯外半径和壁厚。

增压器提供的初始压力 p_0 和体积 V_0 的变化，可使工件空腔内液体压力有较大的调节范围，因而保证了合适的复合液压胀形规范。其技术参数见表 7.1-7。

变形结束时，中断器 15 动作，来自管道的压缩空气进入增压缸 9 的左腔，使活塞向右移动，保证工件内腔的液体压力卸压。

表 7.1-7 空气增单位压器的技术参数

参数	单位	数值
气缸中的初始压力	MPa	0.6
活塞直径	mm	360
活塞杆直径	mm	23
活塞最大行程	mm	440
外形尺寸（长×宽×高）	mm	1 500×1 030×870

当压力机滑块向上移动时，上凹半模 13 回到初始位置，开关 17 动作，使活塞右移回到原位。

增压缸 9 的右腔初始的空腔体积 V_0 可由阀 8 调定，阀 8 可自动确定带杆活塞在任何中间位置，具体位置取决于在活塞杆 6 上的凸轮 7 的位置。

b）专用压力机　图 7.1-47 为支管端部带有支承力 Q_2 的复合液压胀形原理及模具基本结构。图 7.1-48 为相应的专用压力机结构，其主要参数见表 7.1-8。

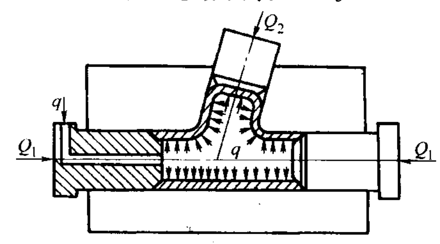


图 7.1-47 带支承力 Q_2 的复合液压胀形原理示意图

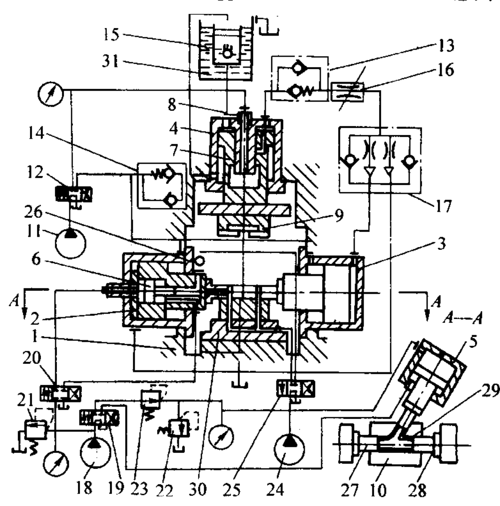


图 7.1-48 复合液压胀形专用压力机结构
1—机身；2、3—水平液压缸；4—垂直液压缸；5—支管支承活塞；
6—增压器；7—液压缸柱塞；8—增压柱塞；9—上半凹模；
10—下半凹模；11、18、24—液压泵；12—分配阀；
13、14—承压阀；15—充液阀；16—分流阀；
17—流量分配阀；19、20、25—分配阀；21、22—安全阀；
23—减压阀；26—逆向阀；27、28—冲头；
29—管坯；30—模座；31—油箱

该机机身为焊接框架式结构，采用液压传动。组合模具安装在工作台上。组合模具由下半凹模 10、两个中心线相同的冲头 27 和 28、一个或多个支承活塞 5 组成。上半凹模 9 安装在压力机滑块上。冲头 27、28 分别与同轴水平液压缸 2 和 3 的活塞杆相连。液压缸 2 的活塞上配置有增压器 6，该增压器专为管坯 29 内提供高压油。垂直液压缸 4 包括油缸柱塞 7 和增压柱塞 8，柱塞 8 与缸体固定，液压缸柱塞 7 与压力机滑块相连，并可带动滑块上下移动，其作用是在向下行程终了时将凹模压紧直至整个复合胀形完成。

水平液压缸 2、3 和垂直液压缸 4 均通过液压泵 11 及由分配阀 12、承压阀 13 和 14、充液阀 15、节流阀 16 和流量分配阀 17 组成的系统来驱动。

增压器 6 和支承活塞 5 经同一节流阀 16 供液，其动作由分配阀 19 和 20、安全阀 21 和 22、减压阀 23 来控制。

为了由增压器预先给管坯内充满油液介质，也为了排除管内的空气，配备有包括油泵 24、分配阀 25 和逆向阀 26 等的独立液压站。

管坯置于下半凹模型腔中，按下启动按钮，接通分配阀 12，来自液压泵 11 的压力油经过柱塞 8 的通道进入液压缸 4



的中间腔，推动柱塞7，同凹模9一起向下移动。此时，油缸4的支承活塞腔内建压，其压力的大小由承压阀14确定，该压力应该足以开启充液阀15，使来自油箱31中的油充满液压缸4的上腔。

在柱塞7的行程终了时，当上半凹模9接近下限位置，增压柱塞8的下端打开柱塞7上的通道，来自油泵11的油经增压器的空腔进入液压缸4的上腔。此时，柱塞7的行程速度降低，充液阀15关闭，上半凹模9以全压力压紧在下半凹模10上。两半凹模闭合后，液压缸4上腔的压力油经过承压阀13、流量分配阀17进入水平液压缸2和3，迫使冲头27和28以相同的速度对向挤压管坯29。

当上半凹模9的位移结束时，按照行程开关的指令伴随分配阀19和25的动作，液压泵24将油液充满管坯29，并经凹模和模座30上的通道排出空气。支承活塞5在液压泵18供给的压力油作用下向前移动，所需压力由减压阀23和承压阀22确定。

当冲头27和28向前行至接近管坯端部时，接通分配阀20，来自分配阀19的压力油供入增压器6中，使增压器6压缩管坯内部的液体压力到安全阀21所规定的值。塑挤胀形时，管坯长度缩短，支管长度增加，当冲头27和28被凹模的护衬挡住时，所有的油缸转为回程。为了避免空气进入增压器6，在其上面经过逆向阀26供给来自泵的油液。至此，完成了一个工作循环，即完成了一个制件的成形。

表7.1-8 压力机的主要参数

参数	单位	数值
管坯最大直径与长度	mm × mm	40 × 25
压力	MN	
压紧凹模		2
水平柱塞缸		0.9
增压器最大液压	MPa	200
工作循环周期	s	20

利用焊接管坯（直径 $\phi 34$ mm、长197 mm、壁厚2 mm），在该机上生产自行车架多通管接件，其生产率为180件/h；此法也可用于生产摩托车车架多通管件（前叉管）。

4）汽车后桥壳整体液压胀形工艺

① 产品简介及传统制造工艺。汽车后桥壳（驱动桥壳）是汽车驱动桥上的重要部件，其功用是支承与保护主减速器、差速器和半轴等，并使左右驱动车轮的轴向相对位置固定；它还与前桥一起支承车架及其上各总成的重量；当汽车行驶时后桥壳还承受由车轮传来的路面反作用力和力矩，并经悬架传给车架。后桥壳应有足够的强度和刚度，且质量小，并便于主减速器的拆装与调整。由于桥壳的尺寸较大，制造较困难，且工艺繁琐，故其结构型式应在满足使用要求的前提下，尽可能便于制造。

对于承载质量1~3 t的轻型汽车，以前国内外多采用冲压焊接式后桥壳，其典型结构如图7.1-49所示。其中桥壳本体总成系由上、下本体，三角镶块（四件），上、下加强环及后堵盖等冲压件经过多道焊接，拼焊成一体。显然，传统的冲压焊接工艺具有制造工艺繁琐、焊接工作量大、材料利用率低、设备工装投资大、污染环境及产品质量差（疲劳寿命低、渗漏、外观质量差）等缺点。

② 后桥壳胀形工艺与工装设计。根据后桥壳本体总成的几何特征是属于直长轴类轴对称管件，且其中部壳形的直径 D 约是其两侧圆柱部分直径 d 的3倍，所用管坯的相对壁厚 $t/d_0 \approx 0.06 \sim 0.07$ 的特点，可以将该产品设计成如图7.1-50所示的整体式结构，以利于采用液压胀形，并且省去了原设计中的三角镶块、下加环及后堵盖等件，从而使制造工艺更简捷。

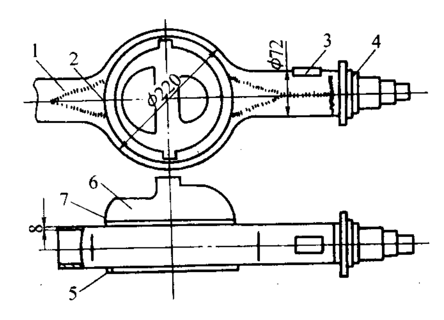
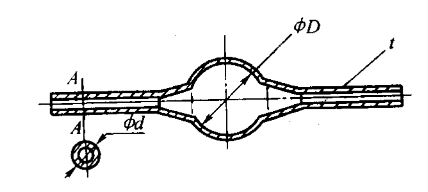
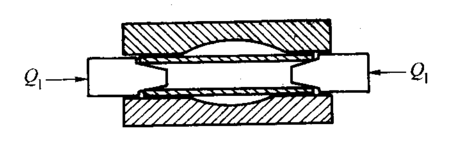


图7.1-49 冲压焊接式轻型车后桥壳

1—桥壳本体；2—三角形镶块；3—钢板弹簧座；4—半轴套管；5—前加强环；6—后加强环；7—后堵盖



(a) 产品图



(b) 液压胀形原理图

图7.1-50 整体式后桥壳本体

为了设计成形工艺与专用液压机，首先应对液压胀形的工艺力进行概算。以图7.1-49所示的1608型农用车（CA1020轻型车后桥壳与其基本相同）后桥壳为例，将所用管坯的尺寸规格、材料性能及相关工艺参数列于表7.1-9中。

表7.1-9 1608型后桥壳液压胀形的主要力能参数

工艺 参数 材料	第一次胀形			第二次胀形		
	合模压力 Q_2/kN	轴向压缩力 F_u/kN	胀形压力 p/MPa	合模压力 Q_2/kN	轴向压缩力 F_u/kN	胀形压力 p/MPa
20	300	120	25	320	150	31
35或16Mn	400	160	35	500	300	45

根据实验结果并参考文献，得出后桥壳液压胀形力能参数计算的经验公式：

液体内压力 p 的计算公式

$$p = 100 \times \left(m + k\frac{\Delta h}{D}\right) \tag{8.1-29}$$

式中，$\frac{\Delta h}{D}$ 为轴向挤压柱塞的相对行程；m，k 为经验系数，根据本胀形件的特点取 $m = 50$，$k = 600$。

代入相关参数即可计算出 $p = 40.45$ MPa。

轴向挤压力 F_u 的计算公式

$$F_u = p\frac{\pi d_{cp}^2}{4} + (\beta\sigma_s + p)\pi d_{cp} t + \mu\left[\frac{(\beta\sigma_s + 2p)t}{d_{cp}} + p\right]\pi d \Delta h \tag{7.1-30}$$

式中，β 为洛德系数，取 $\beta = 1.15$；σ_s 为材料的流动应力，MPa；μ 为摩擦系数，取 $\mu = 0.1$。



代入有关参数后算出 $F_u = 3\ 216$ kN。

垂直方向合模压紧力 F_s 的计算公式

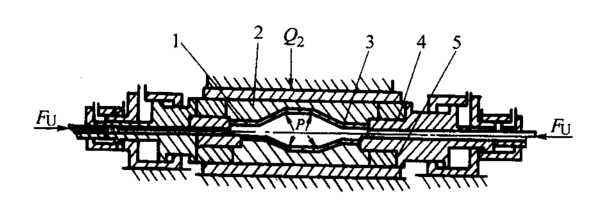
$$F_s = \left[\frac{(\beta\sigma_s + 2p)t}{d_{cp}} + p\right]F \qquad (7.1\text{-}31)$$

式中，F 为工件在模腔内投影面积，mm²；经过计算得出 $F_s = 420$ kN。

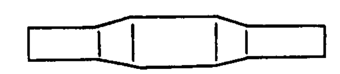
应用实例：

以前述的 1608 型农用车（CA1020 轻型车）后桥壳为例。所用钢管规格见表 7.1-8，采用二次胀形得到整体无焊缝后桥壳。具体胀形工艺过程如下：

首次胀形如图 7.1-51 所示。先将可分式模块 3 与上模 2 一同由液压机的提升缸开启，同时两个串联在一起的轴向压缩油缸退回。这时将管坯 1 放入下模内。之后压机下行压紧下模，与此同时向管坯内部充以高压油液，并将挤压柱塞 5 沿轴向同步向中央推挤。在轴向挤压力 F_u 与内高压 p 联合作用下，管壁金属受迫向中央流动并产生胀形，当挤压柱塞至预定行程时，即得到如图 7.1-51b 所示的首次胀形件。



(a) 液压胀形示意图



(b) 首次胀形得到的预成形件

图 7.1-51　后桥壳的首次液压胀形

1—管环；2—上模；3—可分模块；4—导向环；5—柱塞

第二次胀形如图 7.1-52 所示，所用模具结构与首次胀形模具相同，只是成形模腔不同。将首次胀形件经过退火与酸洗处理后，放进开启的模具中，再进行一次与首次胀形相同的过程，但这时内压力 p 较首次要高。于是在轴向推挤力 F_u 和内高压 p 的复合作用下，使管坯进一步胀形，并贴满成形模腔。至此得到如图 7.1-52b 所示的整体式后桥壳。

为了避免胀形时发生破裂，在两次胀形时管坯中部胀形区直径的扩大率均控制在 50% 以内。实际胀形时所用的力能参数见表 7.1-9。

后桥壳液压胀形所用的模具中工作元件采用分瓣式滑动镶块结构。可根据不同产品（尺寸基本相同）的形状，更换模具镶块。胀形所用的专用液压机与图 7.1-48 所示的基本相同，只是压机工作台面大，需要两级增压器。

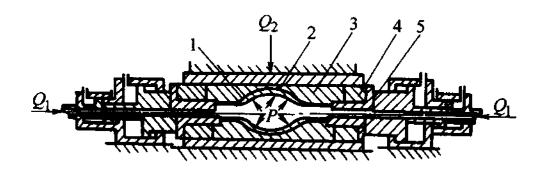
（3）具有弯曲中心线的管件的液压胀形

1）成形过程与特点。如图 7.1-53 所示，将管坯在一个方向上预弯后，放入胀形凹模中，在充满内高压的同时施加轴向力作用于管子的两端。内高压的作用是充满管坯，并使之贴紧模腔，从而得到所需形状的弯曲管件。

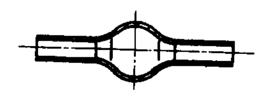
此类液压胀形的特点如下。

① 在不很高的内压作用下，管坯在液压胀形过程中横截面上的变化值较小。

② 通过胀形，既能校正弯曲过程中的畸形，又能将弯曲圆弧的拉压区间的壁厚差异消除，从而提高零件的承载能力。

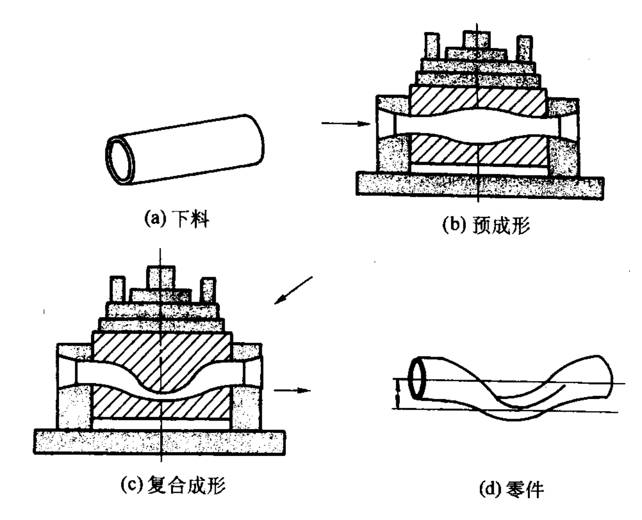


(a) 液压胀形示意图



(b) 最终得到的胀形件

图 7.1-52　后桥壳的第二次液压胀形



(a) 下料　(b) 预成形　(c) 复合成形　(d) 零件

图 7.1-53　具有弯曲中心线的管件的胀形过程

正是由于此类胀形具有这些特点，近年来在汽车结构件轻量化中获得了广泛的应用。采用本工艺可以将传统的先冲压再经焊接联结起来的总成部件，简化成整体的弯曲胀形构件，从而大大简化零件的数量和制造工艺过程，并大幅度提高材料利用率。目前该工艺已成功地用于轿车的副车架、排气歧管及后桥等结构件的成形。

2）轿车副车架液压胀形工艺与工装设计要点

① 基本工序。采用液压胀形生产副车架的工艺过程为（图 7.1-54）：

管坯下料；

预弯；

液压胀形及校正（有时有冲孔）。

② 工艺参数。

a）首先应合理地选择管坯的初始直径：

保证预弯件能顺利地放入胀形模中；

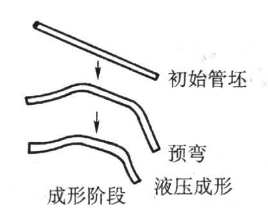
保证有足够的材料补充进入胀形区，使所有横截面基本贴模，达到充分成形。

由于副车架的最大截面是按其承载能力计算出来的，这部位的截面要比两端的圆柱形截面大得多（图 7.1-54）。为了满足充分胀形，根据经验初始管坯的周长应比最大横截面的周长小 3%～5%。

选用管坯的主要参数：初始直径为 φ75～φ85 mm，壁厚 2～3 mm，展开长度为 1 300～1 400 mm，材质为 20 钢的冷拔无缝管。

b）是采用如图 7.1-55 所示的原理图，在数控折弯机上将管坯两端预弯。一般取弯曲的中心半径 R_{CL} 小于 $2D$（D





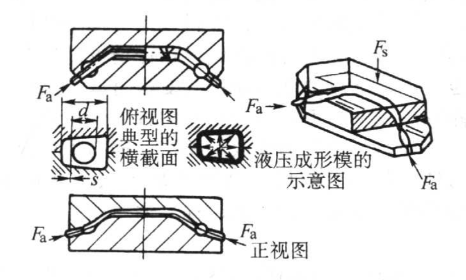


图 7.1-54　副车架液压成形过程

为管坯外径），常取 R_{CL} = 120 mm。折弯后在圆角处会产生椭圆效应并导致内外壁厚差。

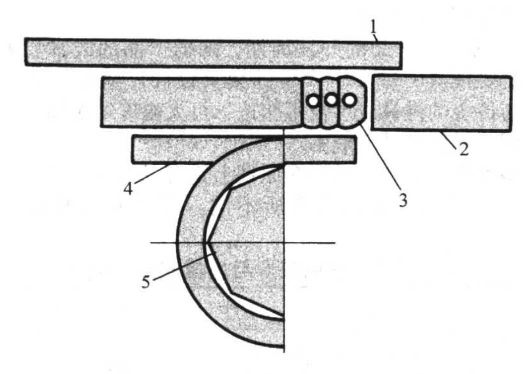


图 7.1-55　数控折弯机预弯示意图

1—压紧块；2—管坯；3—芯棒；4—防皱块；5—弯曲模胎

c）为了防止因内压过高引起胀形破裂，通常是采用低压预胀形和高压终成形两步法胀形。

③ 胀形中的塑性失稳与失效。起皱：在胀形初期，若轴向进给太快，会使预弯曲件的内侧产生皱折。

破裂：过高的内压与进向不协调，会将预弯件胀破。

通过反复试验与有限元模拟分析，得出此类件液压胀形时的成形工作图（图 7.1-56），及端部进给与内压力间的关系图（图 7.1-57），以此可以指导胀形过程，以消除塑性失稳。

④ 结构设计要点。如图 7.1-58 所示，是用初始外径大于成形模腔最小宽度的管坯，液压胀形副车架的模具结构图。当然模具型腔的横截面要与产品相应横截面相符合。在上、下模完全闭合，并在两侧加压柱塞的压力与内压作用下，完成副车架的最终成形。

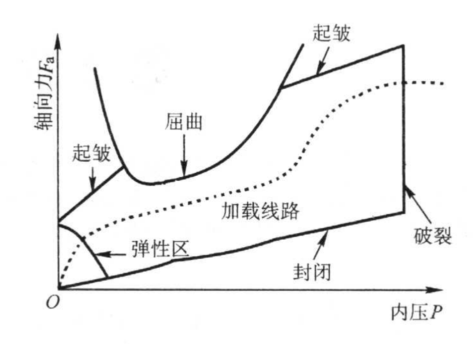


图 7.1-56　液压胀形预弯件时的成形工作图

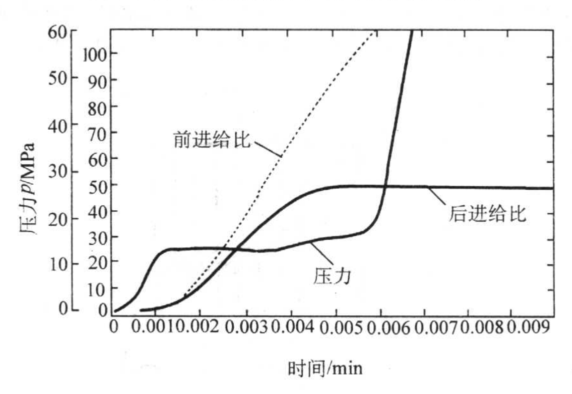


图 7.1-57　胀形预弯件时的端向进给与内压力间的关系

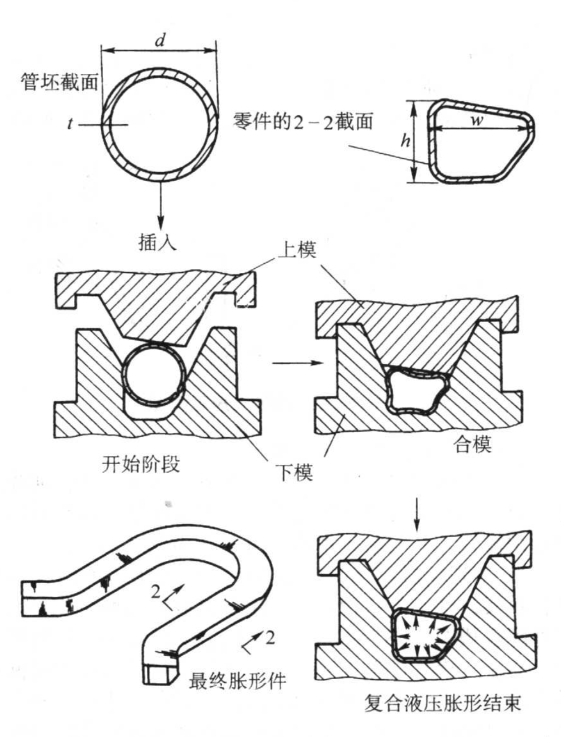


图 7.1-58　管坯初始直径的设计和用于副车架胀形的模具结构图

编写：韩英淳（吉林大学）



第 2 章　板料无模成形

多点成形与增量成形是两种比较典型的板料无模成形技术可以基于产品的数字化信息，由产品三维 CAD 模型直接驱动，通过形状简单的工具包络面实现三维曲面零件的成形。

(1) 多点成形

多点成形的基本思想是将整体模具离散化，由一系列规则排列的基本体（或称冲头）组成点阵来代替模具，通过控制基本体 z 方向的位置坐标，由基本体球头的包络面构成所需的成形曲面，进行板料的快速成形，如图 7.2-1 所示。

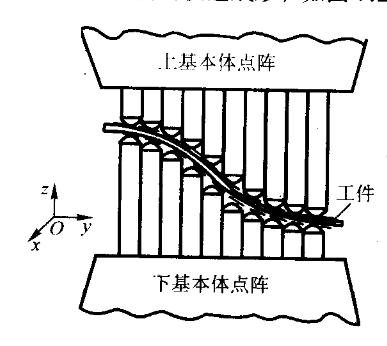


图 7.2-1　多点成形示意图

(2) 增量成形

增量成形根据预先编制好的控制程序，通过一个成形工具头沿 x、y 轴方向的运动及 z 轴方向的进给逐层形成零件的三维包络面，实现板料的逐渐成形，如图 7.2-2 所示。

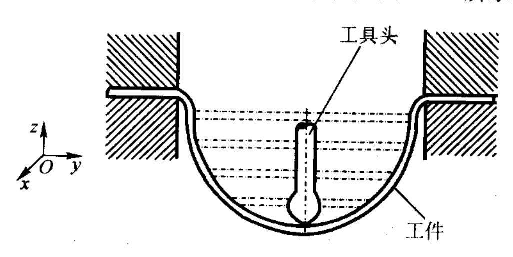


图 7.2-2　增量成形示意图

(3) 技术特点与应用领域

多点成形与增量成形都是以计算机为主要手段实现板料塑性成形的先进智能化制造技术。用这种技术成形板料不需要专用模具，其主要技术特点可归纳为以下几方面。

1) 实现板材三维曲面零件的无模成形，节约大量的模具材料及设计、制造费用。采用多点成形与增量成形均不需另外配置模具，不存在模具设计、制造及调试等问题。因此，与传统模具成形方法相比可节省大量的资金与时间；更重要的是过去因模具造价太高而不得不采用手工成形的单件、小批零件的生产，采用无模成形技术可完全实现规范成形，这将大大提高成形质量。

2) 在一台设备上可进行多种不同形状零件的加工。多点成形是通过基本体群包络面构成的成形面来成形板材的，成形面的形状可通过对各基本体运动的实时控制自由地构造出来，成形面具有可重构性；增量成形是通过控制工具的成形轨迹进行板料成形的；因此，采用无模成形技术，在一台设备上可进行多种不同形状零件的加工。另外，利用多点成形中成形面可变的特点，在多点成形设备上可以实现板料的分段、分片成形，在小设备上能成形大于设备成形面积数倍甚至数十倍的大尺寸零件。

3) 实现板料变路径成形。变路径成形在传统的整体模具成形方式下是很难实现的。通过对各基本体运动的实时控制，多点成形的成形面甚至在板料成形过程中都可随时进行调整，因而，多点成形时板料成形路径是可以改变的；增量成形中也可以通过改变成形轨迹改变板材成形路径。利用板料成形路径可变的特点，结合有效的数值模拟技术，设计适当的成形路径，可达到消除成形缺陷，提高板料成形能力的目的。另外，在多点成形中利用成形工具柔性可重构的特点，还能实现反复成形的工艺过程，消除回弹，减小残余应力。

4) 易于实现 CAD/CAE/CAM/CAT 一体化及板材成形自动化。在多点成形与增量成形中零件的曲面造型、工艺规划等都由计算机完成，而工件检测及成形过程模拟也可以采用计算机技术，因此，容易实现 CAD/CAE/CAM/CAT 一体化。另外，由于无模成形设备是采用计算机进行控制，因而容易实现成形过程的自动化。

5) 缩短新产品的开发周期，降低产品的成本。无模成形不需要模具，省去了大量的模具设计、制造及调试的时间。与传统的模具成形技术相比，可大幅度缩短新产品的开发周期，降低产品的成本。

多点成形与增量成形在原理上是有一定区别的，成形过程中板料的变形方式也有所不同。两种方式的对比如表 7.2-1。

表 7.2-1　多点成形与增量成形的对比

	多点成形	增量成形
成形特点	不适合于成形复杂形状的零件，成形时必须采用弹性垫技术消除压痕缺陷	可成形较为复杂形状的零件
	成形范围比较宽，可以进行中厚板成形，采用压边技术也能进行薄板多点成形；通过分段多点成形工艺能够实现大尺寸零件的成形	通过逐点局部胀形的累积实现板料成形，因此通常所成形的板料厚度比较薄
	结合闭环成形、多道成形以及反复成形等技术可以消除回弹，进一步提高成形精度	成形件的尺寸受到压边结构的限制。另外，由于增量成形是一种减薄成形，无法实现接近 90°倾角的直壁件成形
成形效率	很容易实现单件、小批量零件的规范生产；大批量零件的生产时，仍能保持模具成形方式的生产节拍与成形效率	通过工具头沿成形轨迹连续运动进行板料成形，因而成形效率不高
成形设备	设备的结构比较复杂，造价比较高	设备结构比较简单，对 CNC 车床、CNC 铣床经过简单改装即可进行某些形状零件的成形

多点成形与增量成形适用于各种金属曲面的制造。这种



技术非常适用于单件、小批的零件生产，而且多点成形技术也同样适用于大批量的零件生产。采用无模成形技术可以节省大量的模具设计、制造及修模调试的费用，还可省去保存各种模具所需的大型厂房等，具有许多优越性。所加工的零件尺寸越大，批量越小，这些优越性越突出。这种技术可广泛用于车辆覆盖件、飞机蒙皮、船体外板成形，还可用于压力容器、建筑装饰、城市雕塑、家用电器、厨房用具、洁具及其他轻工产品以及医学工程中各种金属曲面的制造，也可用于鼓风机、汽轮机等叶片的生产。

1　多点成形技术基础

1.1　基本原理

在整体模具成形中，板料三维曲面零件由模具曲面来成形，在多点成形中则由基本体球头构成的成形曲面来完成。各基本体由计算机实时控制，根据零件的目标形状调整基本体的高度能够快速地构造出所需的成形曲面。

一个基本的多点成形系统应由三大部分组成，即 CAD/CAM 软件、控制系统及多点成形主机，如图 7.2-3 所示。CAD/CAM 软件根据成形件的输入信息进行几何造型、成形工艺计算、基本体群成形面设计等，将数据文件传给控制系统，控制系统根据这些数据控制压力机的调整机构，构造基本体群成形面，然后控制压力机的加载机构成形出所需的零件产品。

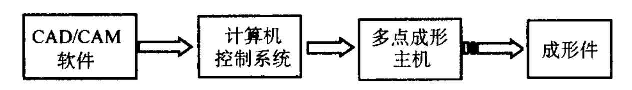
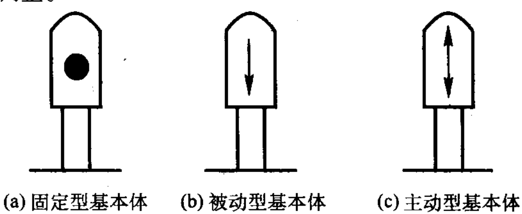


图 7.2-3　多点成形系统的构成

1.2　基本成形方式

(1) 基本体的控制类型

在多点成形中基本体按控制方式可分为三种类型：固定型、被动型及主动型（如图 7.2-4 所示）。固定型基本体的高度在成形过程中固定不变；被动型基本体在成形过程中受到一定的推动作用后，其高度位置将随之改变以保持与板材的接触状态，这种被动结构通常采用液压缸或弹性体实现；主动型基本体的高度可实时控制，即使在成形过程中也可以任意调整。



(a) 固定型基本体　(b) 被动型基本体　(c) 主动型基本体

图 7.2-4　基本的控制类型

在多点成形过程中，随着各基本体的相对移动状态不同，板料的变形路径和载荷分布将发生变化，从而使板料的变形状态有所不同，造成对形状、尺寸和精度有较大的影响。按基本体的不同控制状态，多点成形可分为：多点模具成形、半多点模具成形、多点压机成形和半多点压机成形，如表 7.2-2。

表 7.2-2　多点成形法的分类

名称	成形原理	基本体群的调形	成形中的移动与接触状态	
			基本体之间	基本体和板料
多点模具成形	成形开始 → 成形中 → 成形结束	上、下基本体在成形前调整	上、下基本体群均无基本体间的相对移动	上、下接触点逐渐增加
半多点模具成形	成形开始 → 成形中 → 成形结束	固定型基本体在成形前调整	固定方基本体间无相对移动，被动方基本体间有相对移动	固定方接触点逐渐增加，被动方始终全部接触
多点压机成形	成形开始 → 成形中 → 成形结束	在成形中上、下基本体边调整边成形	上、下基本体群均有基本体间的相对移动	上、下都始终全部接触
半多点压机成形	成形开始 → 成形中 → 成形结束	在成形中主动型基本体边调整边成形	上、下基本体群均有基本体间的相对移动	上、下都始终全部接触



（2）多点模具成形

多点模具成形属于固定型成形方法，其上、下基本体均为固定型，如表7.2-2所示。在成形前，首先按所要成形的零件的几何形状，调整上、下各基本体的高度方向位置，构造出成形曲面，然后按这一固定的曲面形状成形板料；成形曲面在板料成形过程中保持不变，相邻基本体之间无相对移动。

在板料成形过程中，多点模具成形与传统的整体模具成形方式基本相同。从板料和工具的接触状态来看，成形开始时只有比较长的基本体和板料接触并施加成形载荷。伴随着成形的进展，与板料接触的基本体逐渐增多，直至所有的基本体都与板料接触，完成最后成形。

（3）半多点模具成形

半多点模具成形属于固定型成形与被动型成形组合的成形方法，其一方基本体为固定型，另一方基本体为被动型。表7.2-2所示为上部为固定型基本体、下方为被动型基本体的半多点模具成形的原理简图。成形前，上方（固定型）基本体按目标形状预先调整出成形曲面，下方（被动型）基本体成形开始时设定成同样高度，变形过程中下方基本体随着上方基本体运动，并始终与板料相接触，最终形成和上曲面对应的形状，完成最后成形。

在表7.2-2所示的半多点模具成形中上面的基本体和多点模具成形时一样成为一体，其相邻基本体之间无相对移动。但是，采用被动方式的下面相邻基本体之间在成形中能够产生相对移动。

（4）多点压机成形

多点压机成形通过实时控制各基本体的运动，形成随时变化的瞬时成形曲面。其上、下均为主动型基本体，可以把每一个基本体都看做是一台微型压力机，表7.2-2所示为多点压机成形的原理简图。在这种方式中，从成形开始到成形结束，上、下所有基本体始终都与板料接触，成形开始时所有基本体同时移动，成形结束时同时停止，夹持板料进行成形。

多点压机成形过程中成形面不断变化，各基本体之间存在相对运动。这种成形方式能实现板料的最优变形路径成形，消除成形缺陷，提高板料的成形能力。这是一种理想的板料成形方法，但要实现这种成形方式，设备必须具有实时精确控制各基本体运动的功能。

（5）半多点压机成形

半多点压机成形属于主动型控制方式与被动型控制方式组合的成形方法，其一方基本体为主动型，另一方基本体为被动型，表7.2-2所示为上部为主动型基本体、下部为被动型基本体的半多点压机成形的原理简图。这种成形法通过单独调整主动方的各基本体的运动，来改变板料的变形路径，在成形过程中上下基本体都始终与板料接触。

1.3　成形缺陷的产生与控制

与传统板料整体模具成形一样，多点成形中也同样会产生起皱缺陷与回弹现象，但由于接触方式的不同，在多点成形中起皱以及回弹又有新的特点。压痕是多点、不连续接触成形方式中特有的成形缺陷。利用多点成形中成形曲面的可重构性，通过工艺补偿或新的多点成形工艺，起皱、压痕以及回弹等都可以减小甚至完全消除。

（1）压痕

1）压痕的产生。在多点成形中，板料的变形外力来自于冲头对板料的接触作用。冲头头部一般都是球形，与板料的接触区域是一不大的球面。由于接触压强较大，当变形条件不理想时，在接触点附近小区域内，板料将产生局部塑性变形形成压痕。从变形原理上讲，压痕是多点成形方式特有的缺陷。这种缺陷通常主要表现为表面压痕和包络式压痕两种情况，如图7.1-5所示。

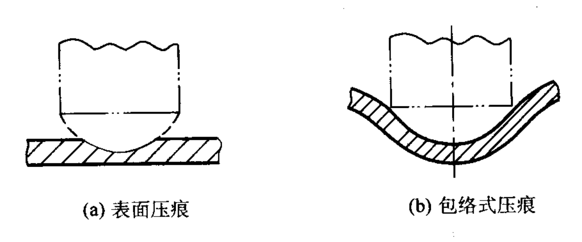


图7.2-5　多点成形中的压痕

表面压痕是一种局部化的变形，冲头压入板料，在板料表面留下凹坑，如图7.2-5a所示。这时板料塑性变形集中在与冲头接触的区域内，该区域内板厚发生比较大的变化，未与冲头接触的区域仅产生很小或不产生塑性变形，这些区域厚向应变很小。包络式压痕是一种类似于局部拉深的变形，板料包裹于冲头上，在全板厚范围内同时发生的整体面外变形，板料上形成冲头形状的凹陷，如图7.2-5b所示。这种变形以板料的拉胀变形与弯曲变形为主，接触区域内厚向应变变化不大，未与冲头接触的板料也跟随变形部位发生面外变形。

在多点成形时，基本体使板料产生局部压入式变形及挠曲变形的趋势是同时存在的。当接触点处挠曲变形刚度大时，则挠曲变形不易产生，这时，大部分外力功使板料产生压入式变形，将出现表面压痕；当接触点处挠曲变形刚度小时（如板料较薄的情况），挠曲变形需要的变形力比较小，挠曲变形极易产生，这时，若约束条件不合理，则出现包络式压痕。

2）压痕的控制方法。压痕的产生主要是由于变形过于局部化造成的。因此，增大接触面积，均匀分散接触压力以及改变约束条件，改变变形路径，使变形均匀化的措施都有抑制压痕的效果。可采取以下几种工艺方法。

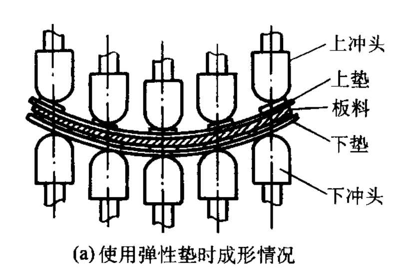
① 采用大曲率半径的冲头。这种方法增大接触面积，降低接触压强，对减轻压痕比较有效。但有时受所成形零件形状的限制，如对于大曲率零件，用大半径的冲头是无法成形的。

② 在冲头与板料之间使用弹性垫。这种方法分散了接触压力，避免了冲头的集中力直接作用于板料，对于抑制表面压痕特别有效。弹性垫可以用橡胶板或弹簧钢条等。

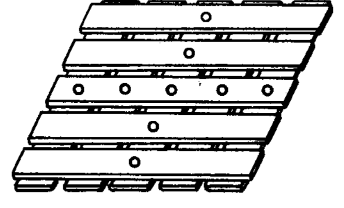
③ 利用多点成形时成形面可变的特点，采用多点压机成形或多道成形等变路径成形方式，使更多基本体接触板料，从而分散接触压力，也是抑制压痕的有效办法。

3）弹性垫技术。最简单的弹性垫方法就是使用和板料相同大小的两块板，把板料夹于其中进行成形。弹性垫的材质、厚度对其抑制成形缺陷的效果有很大影响。如果材质较软，并且厚度比较小，则对控制压痕没有太大的效果；但当其厚度比较大时，由于其自身压缩变形不均，则对加工精度的影响比较大。硬质材质的弹性垫通常使用条状的弹簧钢，如图7.2-6所示为钢条式弹性垫，这种弹性垫的结构如图7.2-6b，上下两层采用钢条直交重叠，在交点处黑圆圈部位用铆钉或点焊固定。采用这种固定方式的弹性垫可以自由地进行弯曲、扭曲等变形，两层板带间还可以相对滑移。在成形过程中，弹性垫产生目标形状的变形，并且将基本体集中载荷分散地传递给板料，所以能显著地抑制压痕的产生。另外，由于弹性垫与板料总是保持接触，对起皱也有抑制作用。成形后弹性垫可以完全恢复到原来的形状，成为平整状态。





(a) 使用弹性垫时成形情况



(b) 钢条式弹性垫的结构

图 7.2-6　弹性垫技术

采用弹性垫能够明显消除压痕，提高成形极限。图 7.2-7、7.2-8 给出了扭曲形状多点成形件的实验研究结果。实验用板料的材质为 1050 铝板和 SUS304 不锈钢板，板料为边长 300 mm 的正方形，铝板的厚度分别取 1、2、3、4、5、6、8 及 10 mm，不锈钢板的厚度分别取 2、3、4、5 及 6 mm。采用的压痕产生程度评价标准为：无压痕——成形好；压痕深度 < 0.5 mm 且压痕数量少——成形较好；压痕深度 > 0.5 mm 且压痕数量较多——成形不良。

图 7.2-7 给出了弹性垫厚度对不同厚度板料的成形性影响。用 A1050 铝板成形扭曲件时，使用弹性垫后成形极限明显改善（如 7.2-8）。当变形程度比较小、板料比较厚时，缺陷少，即使不使用弹性垫也能得到好的成形效果。变形程度增大，板料变薄时，皱纹、压痕都容易产生，这时使用弹性垫的效果显著。

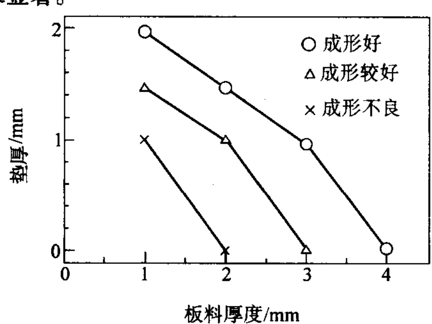


图 7.2-7　板料厚度的影响

图 7.2-8　A1050 铝板的多点成形结果

4）材质与板料厚度对压痕的影响。材质与板料厚度都是影响压痕的重要因素。图 7.2-9 给出了 A1050 铝板和 SUS304 不锈钢板的成形性比较，图中给出的是均未使用弹性垫的结果。可以看出，由于不锈钢板刚性高，难以产生压痕，因此，与铝板相比，不锈钢板能得到比较好的成形结果。

5）不同参数弹性垫对压痕的影响。采用压边多点成形技术成形双向曲率半径均为 400 mm 的马鞍形薄板曲面，上、下基本体点阵均为 40 × 32 排列，基本体球头半径为 $r_p = 10$ mm，板料尺寸为 480 mm × 400 mm，厚度 1 mm，材料为 08AL

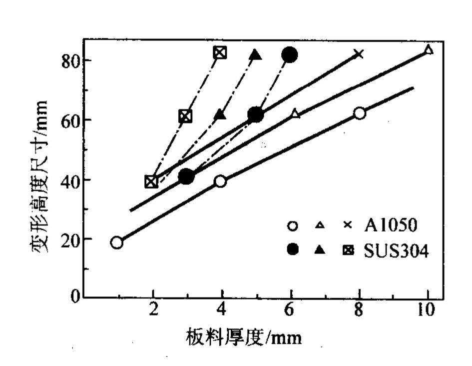


图 7.2-9　A1050 铝板和 SUS304 不锈钢板成形性比较

钢板，弹性模量为 207 GPa，屈服极限为 128.5 MPa，泊松比为 0.3，厚向异性指数 $r = 1.41$。

表 7.2-3 给出了在其他工艺参数相同的条件下，弹性垫厚度与弹性模量对压痕影响的数值模拟结果。

表 7.2-3　使用不同参数的弹性垫时成形结果对比

厚度/mm	弹性模量/MPa			
	10	60	100	200
2	压痕多，成形不良	压痕多，成形不良	压痕多，成形不良	压痕多，成形不良
6	压痕少，成形不良	压痕少，成形较好	压痕少，成形较好	压痕少，成形较好
10	无压痕，成形较好	无压痕，成形好	无压痕，成形好	无压痕，成形好
14	无压痕，成形较好	无压痕，成形好	无压痕，成形好	无压痕，成形好

（2）起皱

1）起皱现象与起皱过程。起皱产生于板料塑性失稳，当局部切向压应力较大，而板面又没有足够约束时，由于面外变形所需能量小，板料的变形路径向面外分叉，由面内变形转为面外变形，出现皱曲。多点模具成形中工具与板料的多点接触形式使约束进一步减少，特别是在成形过程前期，约束不足的问题比较严重，当某些局部面内压应力过大时，比较容易产生起皱。

图 7.2-10 为双向曲率曲面无压边多点成形的示意图。在成形的开始阶段，下基本体群只在四个角点 A、B、C、D 附近与板料接触并约束板料，上基本体群中只有处于中间的基本体在中心点 O 与板料接触并施加作用。这时，在中心线附近，下基本体点阵没有对板料形成约束（如图 7.2-11a）；而在边缘线附近，上基本体点阵没有对板料形成约束（如图 7.2-11b）。

在成形过程中，板料各处都受到向中心 O 的拉入作用，中心点附近的微元体双向受拉，O_1-O_2 及 O'-O''截面的受力与变形如图 7.2-11a；由于角点处基本体的约束，在平行于

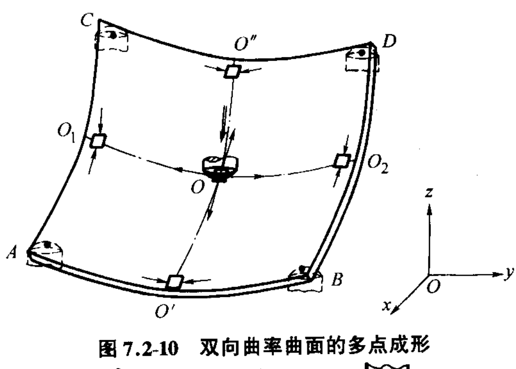
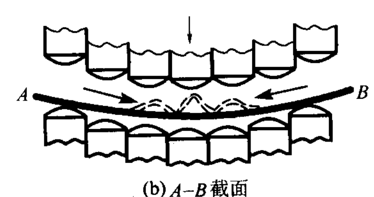


图 7.2-10 双向曲率曲面的多点成形



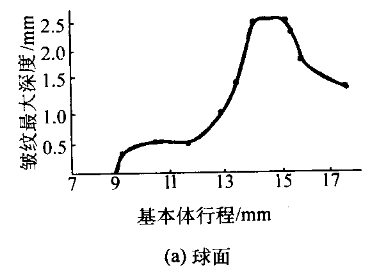
(a) O_1–O_2截面

(b) A–B截面

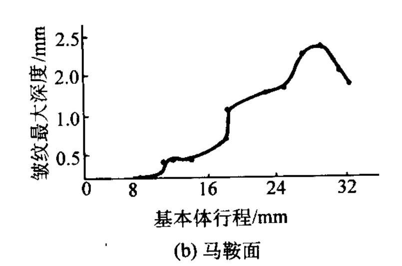
图 7.2-11 多点成形中的局部起皱

板料边缘的切线方向则产生压应力，边缘中点附近的微元体受压。由于合模前，上、下基本体没有对边缘 AB、BD、DC 及 CA 附近的板料构成约束，于是，当压应力较大时，在靠近边缘中点附近，板料的变形转向面外，产生局部皱曲（如图 7.2-11b 所示）。

在多点成形过程中，板料起皱具有明显的阶段性。通过对球面与马鞍面起皱过程的数值分析可以说明这一点。图 7.2-12 给出了皱纹的最大深度随行程的变化曲线。图 7.2-12a 为厚度 0.5 mm、目标曲率半径为 1 200 mm 球面的计算结果，图 7.2-12b 为厚度 0.5 mm、双向目标曲率半径均为 650 mm 的马鞍面的计算结果。



(a) 球面



(b) 马鞍面

图 7.2-12 皱纹最大深度随基本体行程的变化

根据图 7.2-12，板料无压边成形中的起皱过程可以描述如下。

① 成形初期，基本体行程较小，少数基本体接触板料，板料逐渐发生变形。

② 随着基本体行程增大，与板料接触的基本体数量逐渐增多。球面成形件边缘中部及马鞍面成形件中心的局部区域切向压应力逐渐增大。由于这些区域基本体对板料没有形成约束，当球面成形时基本体行程达到 9.1 mm，马鞍面成形时基本体行程达到 10.3 mm 时，开始出现局部皱曲。

③ 皱纹随着基本体行程的增加而不断增大，当球面成形时基本体行程达到大约 31 mm，马鞍面成形时基本体行程达到大约 29 mm 时，皱纹最大。

④ 随着上下基本体逐渐闭合，与板料接触的基本体越来越多，成形件所受约束逐渐增强，部分皱纹被压平，皱纹深度变小。

2）起皱的控制方法。增加对变形中板料的约束，改变变形路径，使变形均匀化以及减小局部压应力等措施都有抑制起皱的效果。改变板料变形路径在传统的整体模具成形中是不可能的，但在多点成形中是完全能够实现的。利用多点成形时成形面可变的特点，采用以下几种方式对消除起皱都是比较有效的。

① 采用多点压机成形方式。这种成形方式通过在成形过程中控制基本体的高度，调整板料的约束状态，改变板料的变形路径，使各部分在成形过程中保持变形均匀或者最大限度地减小不均匀程度，从而避免产生起皱缺陷。

② 采用分段或多道多点成形技术。利用多点成形的基本体群成形面可变的特点，将零件逐段、分区域或分道次连续成形。这种成形方式在每一区域的每次成形中将板料的变形量控制在比较小的范围内，使板料与基本体充分接触，提供足够的变形约束，使变形均匀化，从而避免起皱产生。

③ 使用弹性垫特别是钢条式弹性垫，也有明显的消除起皱的效果。

④ 对于薄板多点成形，压边技术仍是消除起皱缺陷的最有效方法。但是，要实现压边，多点成形设备必须具有压边功能。

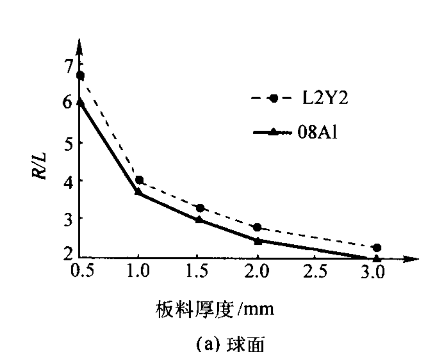
3）起皱现象的数值模拟研究。对不同变形程度、不同厚度成形件的多点成形过程进行系统的数值模拟，即可得到无压边情况下不起皱的多点成形极限。图 7.2-13 给出了 08Al 钢板和纯铝 L2Y2 铝板两种材料时球面与马鞍面成形件的不起皱极限图，其中，R 为球面或马鞍面的目标曲率半径，L 为正方形板料的边长，基本体为 30 × 30 排列。可以看出，L2Y2 的成形极限位于 08AL 的上面，这表明同样厚度、同样变形程度情况下，L2Y2 铝板的起皱更加明显，也就是说 08AL 材料与 L2Y2 相比不容易起皱。

（3）回弹

1）回弹的产生。回弹是板料成形时不可避免的现象。在外载荷作用下板料的变形由塑性变形和弹性变形两部分组成，当外载荷卸掉后，塑性变形保留下来，而弹性变形则回复，使成形件的形状和尺寸都发生与加载时变形方向相反的变化，这就是回弹现象。在弯曲变形时加载过程中变形区的内层和外层的应力和应变的性质相反，卸载时这两部分回弹变形的方向也是相反的，因此，回弹在弯曲件中引起的形状和尺寸变化最为显著。

在中厚板无压边多点成形中，成形件的变形量一般都不大。由于没有压边圈，板料面内变形力较小，主要以弯曲变形为主，因而回弹对成形件最终形状的影响比较大。利用多点成形中成形面的可变性，可根据预测的回弹大小及分布情况，通过对基本体群成形面进行补偿，来减小甚至完全消除回弹。

2）板条弯曲时的回弹计算。回弹量的预测是实施基本体群成形面补偿技术的基础。回弹计算是比较复杂的问题，通常要采用数值模拟的方法。但对于板条弯曲这样的简单问题，可以给出回弹的近似表达式，这些结果对于多点成形工



(a) 球面

(b) 马鞍面

图 7.2-13　08AL 和 L2Y2 材料的不起皱成形极限

艺设计时进行回弹估算具有参考价值。

考虑理想弹塑性板条，设其厚度为 t、宽度为 b、截面惯性矩为 I，材料的弹性模量为 E'、泊松比为 μ，屈服应力为 σ_y，在弯矩 M 的作用下纯弯曲，产生弯曲变形，由于宽度 b 比厚度 t 大得多，可以近似认为满足平面应变条件。

当弯曲处于弹性范围时，弯矩－曲率关系为

$$M = EI\kappa \tag{7.2-1}$$

其中，$E = E'/(1-\mu^2)$

当板条的最外层纤维开始屈服时，对应的曲率为最大弹性曲率 κ_e，相应的弯矩为最大弹性弯矩 M_e，且有

$$M_e = EI\kappa_e = \frac{1}{6}\sigma_y bt^2,\quad \kappa_e = 2\sigma_y/Et \tag{7.2-2}$$

当板条的整个截面都进入屈服状态时，对应的弯矩为塑性极限弯矩 M_p，且

$$M_p = \frac{1}{4}\sigma_y bt^2 \tag{7.2-3}$$

则板条能够承受的弯矩为：$M < M_p$。当板条施加的弯矩 $M_e \leqslant M < M_p$ 时，距中性轴 $z_y = \sigma_y/E\kappa$ 处的纤维达到初始屈服，这时的弯矩－曲率关系为

$$M = 2\int_0^{z_y} E\kappa bz^2 dz + 2\int_{z_y}^{t/2}\sigma_y bz dz = \frac{1}{4}\sigma_y bt^2 - \frac{\sigma_y^3 b}{3E^2\kappa^2} \tag{7.2-4}$$

引入无量纲弯矩和无量纲曲率

$$m = M/M_e,\quad \varphi = \kappa/\kappa_e \tag{7.2-5}$$

由式（7.2-3）、式（7.2-4）可得

$$\kappa = m\sqrt{3 - 2m/\kappa_e} \tag{7.2-6}$$

并可写出无量纲形式弯矩－曲率关系

$$m = \begin{cases} \varphi & \text{当 } \varphi \leqslant 1 \\ \dfrac{3}{2} - \dfrac{1}{2\varphi^2} & \text{当 } \varphi > 1 \end{cases} \tag{7.2-7}$$

当施加的弯矩 M 卸除时，若卸载不引起反向屈服，则卸载过程相当于对板条施加一个 $-M$ 弯矩引起的弹性效应，因而，最终曲率为

$$\kappa_f = \begin{cases} 0 & \text{若 } 0 \leqslant M \leqslant M_e \\ \kappa - \dfrac{M}{EI} & \text{若 } M_e \leqslant M \leqslant M_p \end{cases} \tag{7.2-8}$$

回弹后与回弹前的曲率之比为回弹比，式（7.2-2）、式（7.2-3）代入式（7.2-8）得

$$\eta = \frac{\kappa_f}{\kappa}\begin{cases} 0 & \text{若 } 0 \leqslant m \leqslant 1 \\ 1 - m\sqrt{3-2m} & \text{若 } 1 \leqslant m \leqslant 3/2 \end{cases} \tag{7.2-9}$$

式（7.2-7）代入式（7.2-9）则得回弹比

$$\eta = \begin{cases} 0 & \text{若 } \xi \geqslant 1/2 \\ 1 - 3\xi + 4\xi^3 & \text{若 } \xi \leqslant 1/2 \end{cases} \tag{7.2-10}$$

其中，$\xi = \sigma_y R/Et$，$R = 1/\kappa$ 为回弹前的曲率半径。

由式（7.2-10）可以很方便地从回弹前的曲率半径求出回弹后的曲率半径。

3）回弹的控制方法。在多点成形中，利用成形面可变的特点，可以控制回弹。具体方法主要有以下几种。

① 通过对基本体群成形面进行补偿，可以减小甚至完全消除回弹的影响。当然，对回弹进行准确补偿，要建立在对回弹量准确预测的基础上。回弹量通常可以采用数值模拟来计算，也可通过实验来确定。

② 采用闭环成形方法，零件成形后，测量出曲面几何参数，与目标形状进行比较，根据二者的几何误差重新调整基本体群成形面，进行再次成形。这样反复几次即可消除回弹的影响，获得精确的零件。

③ 采用反复成形技术，以目标形状为中心反复成形，逐渐可收敛于目标形状。

2　多点成形工艺

多点成形是一种全新的板料成形方式，利用多点成形的成形面柔性可重构的特点，可实现常规板料成形无法实现的新工艺，实现理想的成形效果。实用的多点成形工艺及特点如表 7.2-4 所示。

表 7.2-4　多点成形工艺及特点

名称	工艺过程	工艺特点
一次成形	目标零件信息输入 → 基本体群成形面造型 → 多点成形 → 目标零件	与传统模具成形类似，工艺简单
分段成形	目标零件信息输入 → 确定分段数目 → 过渡区设计 → 基本体群成形面造型 → 多点成形 → 目标零件（逐段循环：多点成形 → 过渡区设计）	实现小设备成形大尺寸零件
多道成形	目标零件信息输入 → 变形路径设计 → 确定每道成形的变形量 → 基本体群成形面造型 → 多点成形 → 目标零件（逐道次循环：多点成形 → 确定每道成形的变形量）	实现大变形量零件成形，提高板料成形能力

续表 7.2-4

名称	工艺过程	工艺特点
反复成形	目标零件信息输入 → 确定每次反复成形的相对变形量 → 基本体群成形面造型 → 多点成形 → 形状是否满足要求 —是→ 目标零件；—否→ 反复成形 → 确定每次反复成形的相对变形量	减小残余应力，减小或消除回弹
闭环成形	目标零件信息输入 → 基本体群成形面造型 → 多点成形 → 曲面测量 → 形状是否满足要求 —是→ 目标零件；—否→ 曲面误差计算 → 计算闭环成形修正曲面 → 基本体群成形面造型	实现零件精确成形
薄板成形	目标零件信息输入 → 压边型面设计 → 基本体群成形面造型 → 多点成形 → 目标零件	实现薄板零件柔性成形

2.1　一次成形

(1) 成形原理

一次多点成形工艺与传统的整体模具冲压成形类似，如图 7.2-14 所示。根据零件的几何形状并考虑材料的回弹等因素设计出成形面，在成形前调整各基本体的位置，按调整后基本体群成形面一次完成零件成形。对于中、厚度变形不太剧烈的曲面零件，可直接进行多点成形，不需要压边。如果板材坯料计算准确，这种成形方法的材料利用率最高，且可省去后续的切边工序。

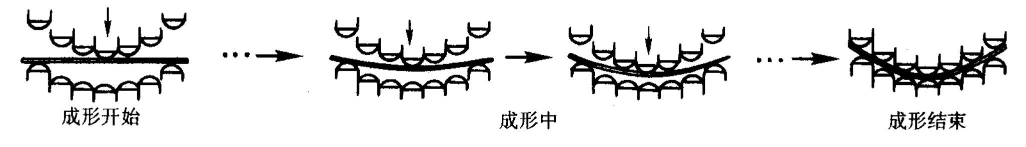


图 7.2-14　一次多点成形示意图

(2) 成形力的计算

对于无压边的一次多点成形工艺，成形同向双曲度三维曲面时，采用四块变形模式，成形力可按下式近似计算（如图 7.2-15）

$$P = 2\sigma_y t\delta \qquad (7.2\text{-}11)$$

式中，σ_y 为材料的屈服应力；t 为板料的厚度；δ 为曲面的 z 方向最大位移。

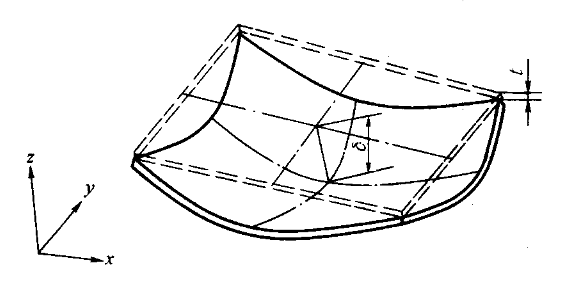


图 7.2-15　双曲度三维曲面

2.2　分段成形

(1) 成形原理

分段成形通过改变基本体群成形面的形状，在不分离板材的前提下，逐段、分区域地对板材连续成形，从而实现小设备成形大尺寸、大变形量的零件。分段成形包括单向分段成形与双向分段成形，图 7.2-16 是一个分成六段的双向多点分段成形示意图。

分段成形的工艺过程如表 7.2-4 所示。首先确定成形分段数，然后利用 CAD 软件设计过渡区，并根据零件及过渡区的几何形状并考虑材料的回弹等因素逐段设计出成形面，

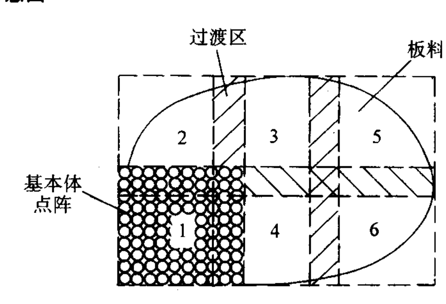


图 7.2-16　分段多点成形示意图

最后逐段进行多点成形。

(2) 过渡区设计

分段成形时，基本体成形曲面大致分成两个区域（如图 7.2-17），即有效成形区成形面与过渡区成形面。有效成形区成形面与目标形状基本吻合，经有效成形区成形面压制后，板料达到成形件的目标形状；过渡区成形面并不是目标形状，板料经过渡区成形面成形压制后也不是最终形状，在下一步分段成形时还要进一步变形。

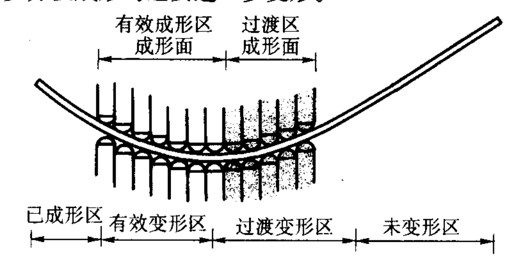


图 7.2-17　分段成形时基本体成形面两个区域示意图

与基本体成形面分区相对应，板料的变形分成四个区：



已成形区、有效变形区、过渡变形区及未变形区。板料各变形区由于受力状态不同，变形规律亦有明显差别。在分段成形过程中这几个区域是相互关联、相互影响的。过渡区是衔接有效成形区与未变形区的重要环节，过渡区成形面的几何形状对分段成形结果影响最大，过渡区设计不合理将产生起皱、过度的局部大变形甚至开裂，从而导致分段成形的失败，因此，过渡区设计是分段成形最关键的技术问题。在单向分段成形中每段成形时只一个方向有过渡区，而双向分段成形中每段成形时两个方向都有过渡区。

设计基本体成形面过渡区形状的目的是要协调目标形状和坯料形状，使过渡区内变形均匀，避免局部剧烈的变形出现。如果把它抽象为一个数学问题，可以描述为从目标形状边缘的截面线（一般为曲线）在过渡区的范围内均匀过渡到坯料的截面线（一般为直线）的问题。利用NURBS直接生成过渡区是一种比较简单、实用的成形面过渡区设计方法。对单向分段成形，在坯料截面为直线的情况下，基于NURBS的过渡区设计应遵循以下原则。

1）过渡区表面至少应保持 C^2 连续。

2）过渡区与工件成形区曲面连续。即要求过渡区表面与工件成形区相接的边界线应与成形区对应处的边界线重合。

3）过渡区与未变形区曲面连续。即要求过渡区表面与坯料相接的边界线应与坯料对应处的边界线重合。所以过渡区的另一条边界线是直线，但也可以是一条曲率较小的曲线。

4）过渡区曲面与成形区曲面和未变形区曲面都应达到 G^1 连续，既沿各公共连接线处具有公共的切平面。

2.3 多道次成形

（1）成形原理

对于变形量较大的零件，可逐次改变多点模具的成形面形状，进行多道次成形。其基本思想是将一个较大的目标变形量分成多步，逐渐实现。通过多道次的成形，将一步步的小变形，最终累积到所需的大变形，图7.2-18为多道多点成形示意图。通过设计每一道次成形面形状，可以改变板材的变形路径，使各部分变形尽量均匀，使板材沿着近似的最佳路径成形，从而消除起皱等成形缺陷，提高板材的成形能力。

多道多点成形的工艺过程如表7.2-4所示。首先确定多道成形的次数，然后确定每次成形的相对变形量，利用CAD软件设计出每次成形的基本体群成形面，最后逐次进行多点成形。多道成形各道次的变形量可以通过变形路径优化来获得。

板料成形过程中产生的起皱、压痕等缺陷主要源于变形不均。如果在保证零件最终形状的前提下，调整板料的变形路径，使各部分在成形过程中保持变形均匀或者最大限度地减小不均匀程度，则可以减少甚至完全避免成形缺陷的出现。多点压机成形是实现变路径成形的一种理想方式，而多道成形的方法则通过逐次改变成形面形状，用多点模具成形方法模拟多点压机成形。多道成形是一种变路径成形方式，通过对成形路径的优化，采用多道成形就能够实现大变形量的板料成形。

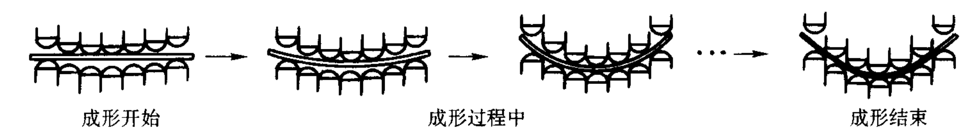


图7.2-18 多道多点成形示意图

（2）成形路径优化设计

成形路径设计是多道成形需要解决的关键技术问题。目前，有两种成形路径设计方法，一种是纯几何方法，另一种是基于材料变形功的有限元方法。纯几何方法比较简单，应用也比较方便。以球面成形为例，图7.2-19所示为三种不同的成形路径。

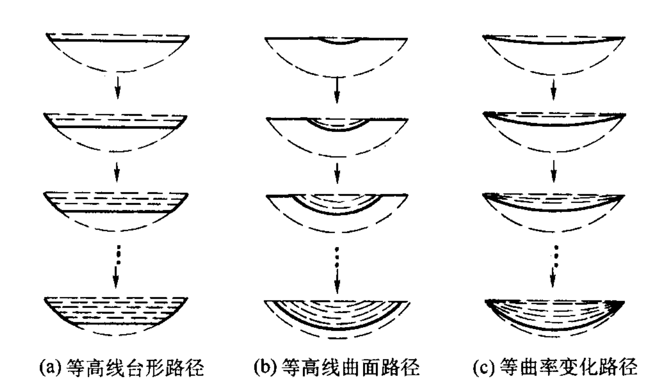


图7.2-19 用于球面成形的不同成形路径

（3）多道成形与一次成形对比实验

采用多道成形的方法，沿着近似的优化变形路径进行板料成形，能够明显地抑制成形缺陷，提高材料的成形极限。图7.2-20为球面、马鞍面的多道成形与一次成形的对比实验结果。

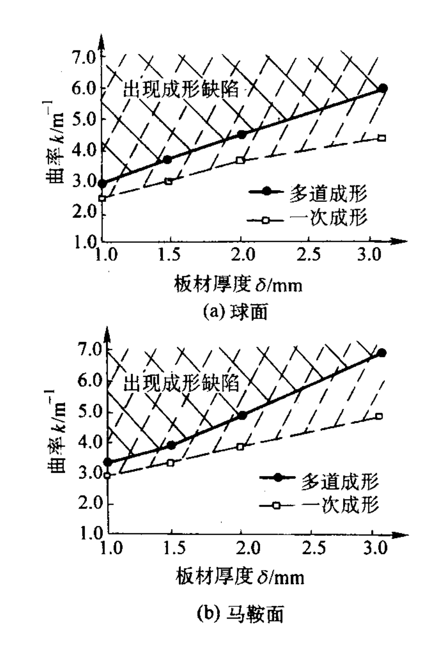


图7.2-20 多道成形与一次成形的成形极限对比

由图可见，采用多道成形法有效地抑制了成形缺陷出现，使板材的成形能力比一次成形有了很大的提高，实现了板材的大变形量成形。板材越厚，成形能力提高的幅度越大。



2.4 反复成形

（1）成形原理

回弹是板料冲压成形中不可避免的现象，在多点成形中，可采用反复成形的方法降低残余应力，并减小或消除回弹。

反复成形时，首先使变形超过目标形状，然后再反向变形并越过目标形状，再正向变形……，如此以目标形状为中心循环反复成形，直至收敛于目标形状，图 7.2-21 为反复成形过程示意图。

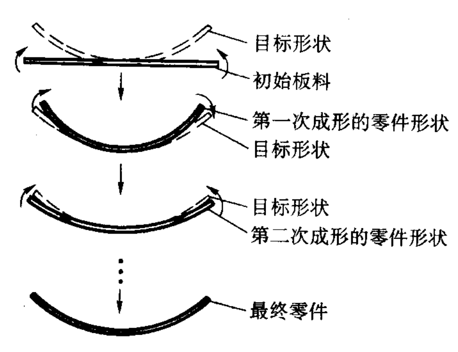


图 7.2-21 反复成形示意图

以 S_i 表示反复成形的第 i 次成形卸载后板料的几何形状。设初始形状为 S_{ini}，目标形状为 S_{obj}。以 D_l^k 表示对从 S_k 到 S_l 变形量的度量，且以正加载方向为正。则反复成形方法可表述如下：

第一次正向加载，$D_{obj}^1>0$

第二次反向加载，$D_{obj}^2<0$，且 $|D_{obj}^2|<|D_{obj}^1|$

第三次正向加载，$D_{obj}^3>0$，且 $|D_{obj}^3|<|D_{obj}^2|$

……

如此反复加载成形。由每次加载成形变形量的关系可以得到

$$|D_{obj}^i|<\frac{1}{2}|D_i^{i-1}|$$

可见，在反复成形中随着前后两次成形之间相对变形量的减小，弹性回复引起的板料曲率变化量也越来越小，成形后的形状将最终收敛于目标形状即 $D_{obj}^n\to 0$。

反复成形的工艺过程如表 7.2-4 所示。首先按正向、反向、正向、反向、……的顺序设计每次的相对变形量，利用 CAD 软件设计出每次成形的基本体群成形面，最后逐次进行多点成形，直至得到理想的目标形状。

（2）反复成形消除回弹

以成形目标形状为扭曲面为例，目标扭曲角为 19°，材料为 L2Y2 铝板，图 7.2-22 给出了六次反复成形的实验结果。

可以看出，在反复成形中，随着反复成形次数的增加，试件的弹性回复越来越小，最终稳定于目标尺寸。

板料厚度对反复成形中的回弹都有较大影响。图 7.2-23 给出了四种不同厚度的铝板采用六次反复成形时的实验结果，目标形状为两个方向曲率半径均为 180 mm 的马鞍面，图中的回弹量由曲率变化表示。

实验结果表明，随着反复成形次数的增加，回弹量都在逐渐减小，且最终稳定于目标尺寸。但厚度为 0.8 mm 的试件经六次反复成形后与目标形状仍有 0.05 m^{-1}的偏差，这是因为其厚度小回弹大引起的，根据其变化趋势，采用更多次数的反复成形，依然可以稳定于目标形状。

（3）反复成形中的残余应力计算

由于反复多点成形中接触边界、材料非线性以及加载卸载等变化，计算残余应力是非常复杂的问题，通常只能进行

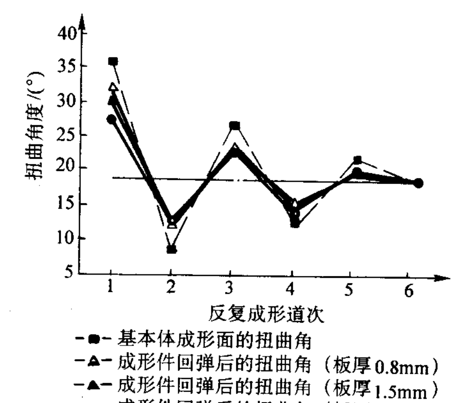


图 7.2-22 反复成形实验结果

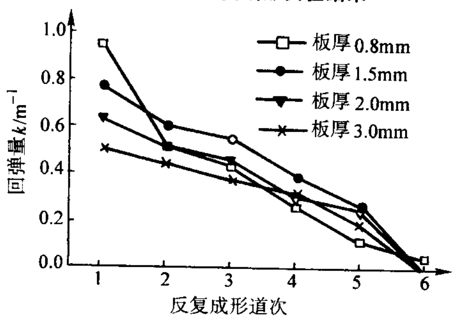


图 7.2-23 不同厚度的试件在反复成形过程中回弹的变化

数值分析。理想弹塑性材料的板条反复纯弯曲成形问题，经过简化可以得到近似的解析解。在反复成形的第 i 次成形时，弹性区的高度及卸载后的残余应力由下式计算

$$\begin{cases} {}^{i}\sigma_{t/2}^{*}=(-1)^{i+1}-{}^{i}\hat{M} \\ {}^{i}\sigma_{\omega i}^{*}=(-1)^{i+1}-2\hat{\omega}_i{}^{i}\hat{M} \\ \cdots \\ {}^{i}\sigma_{\omega_k}^{*}={}^{i-1}\sigma_{\omega k}^{*}+2\hat{\omega}_k[{}^{i-1}\hat{M}-{}^{i}\hat{M}+(-1)^{i+1}/\hat{\omega}_i] \\ \cdots \\ {}^{i}\sigma_{\omega_1}^{*}={}^{i-1}\sigma_{\omega 1}^{*}+2\hat{\omega}_1[{}^{i-1}\hat{M}-{}^{i}\hat{M}+(-1)^{i+1}/\hat{\omega}_1] \end{cases} \tag{7.2-12}$$

其中 $\hat{\bar{\omega}}_i=\frac{1}{2}\sqrt{3+(-1)^{i+1}({}^{i-1}\hat{M}-{}^{i}\hat{M})}$,

$${}^{i}\hat{M}=(-1)^{i+1}\left(\frac{3}{2}-2\hat{\bar{\omega}}_i^2\right)-4\,{}^{i-1}\hat{\sigma}_{\bar{\omega}}^{*}\,\hat{\bar{\omega}}_i^2-12\int_{\hat{\bar{\omega}}_i}^{\frac{1}{2}}{}^{i-1}\hat{\sigma}^{*}(\hat{y})\hat{y}\mathrm{d}\hat{y},$$

无量纲量 ${}^{i}\hat{\sigma}^{+}(\hat{y})={}^{i}\hat{\sigma}^{+}(\hat{y})/\sigma_s$，${}^{i-1}\hat{\sigma}_{\bar{\omega}}^{*}(\hat{y})={}^{i-1}\hat{\sigma}_{\bar{\omega}}^{*}(\hat{y})/\sigma_s$，$\hat{\bar{\omega}}_i=\bar{\omega}_i/t$，$\hat{y}=y/t$，${}^{i-1}\sigma_{\bar{\omega}}^{*}$ 为到中性面距离 $\bar{\omega}_i$ 的点在第 $i-1$ 次成形卸载后的残余应力。

分别取每次成形的单位宽度无量纲外弯矩为 1.4、-1.25、1.2、-1.15 及 1.05，由式（7.2-12）可计算出五次成形卸载后残余应力。图 7.2-24 给出了残余应力沿板厚方向从中性面到上表面的分布，图中给出的值是残余应力的峰值。由计算结果可以看出，经三次成形后板内的残余应力已明显减小。

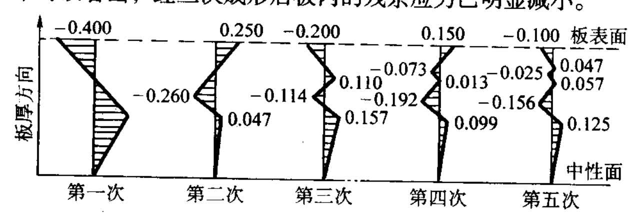


图 7.2-24 板条反复弯曲成形时残余应力沿板厚的分布（单位：σ_y）



2.5 闭环成形

(1) 成形原理

利用基本体群成形面的形状可以任意调整的特点，在多点成形中可采用闭环技术实现智能化的精确成形。即零件第一次成形后，测量出曲面几何参数，与目标形状进行比较，根据二者的几何误差通过反馈控制的方法进行运算，将计算结果反馈到 CAD 系统，重新计算出基本体群成形面进行再次成形。这一过程反复多次，直到得到所需形状的零件，图 7.2-25 为闭环成形过程示意图，其工艺过程见表 7.2-4 所示。

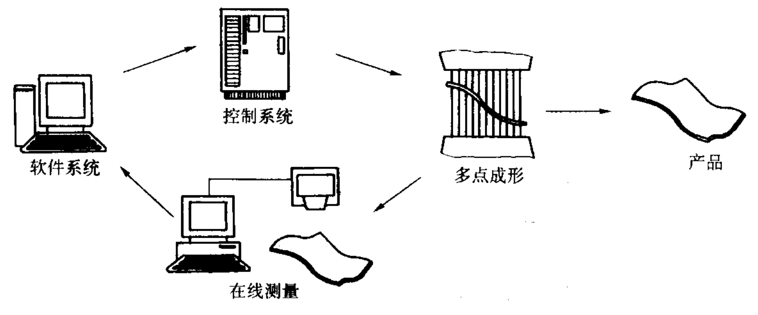


图 7.2-25 闭环成形过程示意图

(2) 传递函数与基本体成形面计算

在板料多点成形中，影响成形精度的变量很多，如被成形件的材料参数、基本体群成形面的形状、成形压力以及弹性垫的性能参数等，而系统的输出主要是成形件的形状。在多点成形过程中，将影响成形过程的变量看作系统的扰动量，用基本体群成形面形状与成形件形状构成输入输出对，从而多点成形系统从某种意义上可简化为单输入输出系统。这时成形过程的传递函数可定义为

$$\boldsymbol{H}(u,v)=\boldsymbol{P}(u,v)/\boldsymbol{D}(u,v) \tag{7.2-13}$$

式中 $\boldsymbol{P}(u, v)$ 与 $\boldsymbol{D}(u, v)$ 分别为成形件形状（输出）与基本体群成形面形状（输入）的傅里叶变换，即

$$\boldsymbol{P}(u,v)=\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}\boldsymbol{p}(x,y)\exp\left[-j2\pi\left(\frac{ux}{M}+\frac{vy}{N}\right)\right]$$

$$\boldsymbol{D}(u,v)=\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}\boldsymbol{d}(x,y)\exp\left[-j2\pi\left(\frac{ux}{M}+\frac{vy}{N}\right)\right] \tag{7.2-14}$$

$$(u=0,1,2,\cdots,M-1 \quad v=0,1,2,\cdots,N-1)$$

其中，$\boldsymbol{p}(x, y)$ 与 $\boldsymbol{d}(x, y)$ 分别为成形件与基本体群成形面三维曲面在空间上的离散矩阵，M 与 N 分别为 x 与 y 方向的离散点数。

两次成形过程中的传递函数的增量可写成

$$\boldsymbol{H}_i=(\boldsymbol{P}_i-\boldsymbol{P}_{i-1})/(\boldsymbol{D}_i-\boldsymbol{D}_{i-1}) \tag{7.2-15}$$

在多点成形闭环控制中传递函数 $\boldsymbol{H}_i(u, v)$ 可通过非参数化系统辨识方法进行在线识别。这样，由前一次成形过程的基本体群成形面和成形件形状可预测出下一次的基本体群成形面形状：

$$\boldsymbol{D}_i+1=\boldsymbol{D}_i+\boldsymbol{E}_i\boldsymbol{H}_i^{-1} \tag{7.2-16}$$

式中，$\boldsymbol{E}_i=\boldsymbol{P}_{obj}-\boldsymbol{P}_i$，$\boldsymbol{P}_{obj}$为成形件的目标形头。

根据式 (7.2-16) 预测的下一次的基本体群形状调整各基本体，进行多点闭环成形，直到得出合格的目标形状。

(3) 闭环成形实验

成形件的目标形状分别取为半径 300 mm 的球面与半径 150 mm 的圆柱面。实验材料为 3 mm 厚的 L2Y2 铝板，尺寸为 100 mm × 100 mm，成形力为 50 kN，采用橡胶板做弹性垫。图 7.2-26 给出了球面成形件在闭环成形过程中的最大面误差与曲面均方根误差曲线，表 7.2-5 给出了圆柱面成形件在闭环成形过程中的成形误差。

不难看出，球面成形件经过 5 次闭环成形后，曲面最大绝对值误差从 4.4 mm 减小到 0.25 mm，曲面均方根误差从 1.3 mm 减小到 0.10 mm；可见，采用闭环多点成形技术，成形件曲面形状误差收敛的速度较快，经过 5 次多点闭环成形即可收敛到所要求的目标形状。

2.6 薄板多点成形

起皱缺陷的控制是薄板曲面件多点成形时的关键技术问题。在传统的板料成形中，一般通过采用压边圈与拉延筋，来改变板料的受力与约束状态，从而消除起皱。在多点成形中，也需采用压边技术抑制起皱的产生，实现薄板的拉深成形。图 7.2-27 为薄板多点成形示意图，其压边由液压缸进行控制。

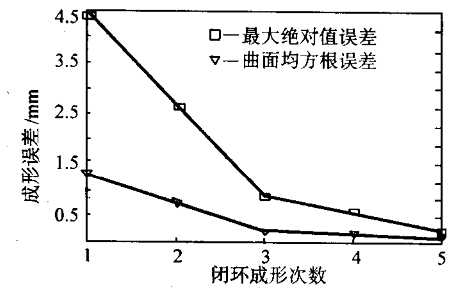


图 7.2-26 球面件闭环成形过程中的误差曲线

表 7.2-5 柱面件闭环成形过程中的成形误差

次数	最大面误差 /mm	均方根误差 /mm
第一次成形	1.721	0.808
第二次成形	1.253	0.589
第三次成形	1.048	0.479
第四次成形	0.850	0.361
第五次成形	0.174	0.130

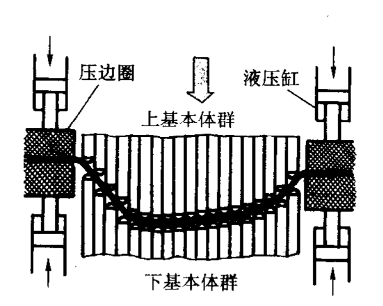


图 7.2-27 带有压边的薄板多点成形示意图

3 多点成形设备

多点成形设备由 CAD/CAM 软件、控制系统及多点成形压力机三个基本部分组成，上、下基本体群是多点成形压力设备的核心部分。



3.1　基本体单元及调形

多点成形区别于传统的冲压成形的主要特征是，冲压成形中板料成形是由形状不可变的整体模具完成的，而多点成形则是由基本体群包络面构成的成形面来完成。由基本体单元组成的基本体群是多点成形压力机的核心部件，通常使用的基本体单元主要有机械式和液压式两种结构。

（1）调形方式

多点成形中的成形面是根据零件成形的需要通过调整基本体的高度来构造，构造成形面的过程就是调形。调形过程要在零件成形前或在成形过程中完成。因此，快速、准确地调形是多点成形中最重要的环节之一。按基本体调整机构的工作原理及调形方式的不同，板料多点成形设备往往分成串行式或并行式两种不同的调形方式。

1）串行式调形。串行式调形是一种以机械手为主体的调形方式。即通过机械手依次调整每个基本体（或同时调整几个基本体），使其达到目标高度，最后得到所需的成形面。调形过程如图7.2-28所示。

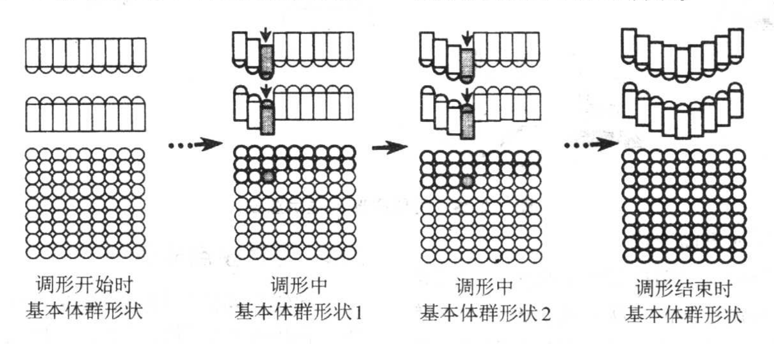


图7.2-28　串行式调形方式示意图

2）并行式调形。并行式调形是一种以一对一的控制单元为主体的调形方式。每个基本体都有独立的调整装置和数控单元，调形时各基本体同时进行高度调整。调形时间由基本体最大调整行程决定，与基本体数量无关。调形过程如图7.2-29所示。与串行调形方式相比，这种调形方式的效率显著提高，所需调形时间明显缩短，因此，常常将并行调形方式亦称为快速调形。

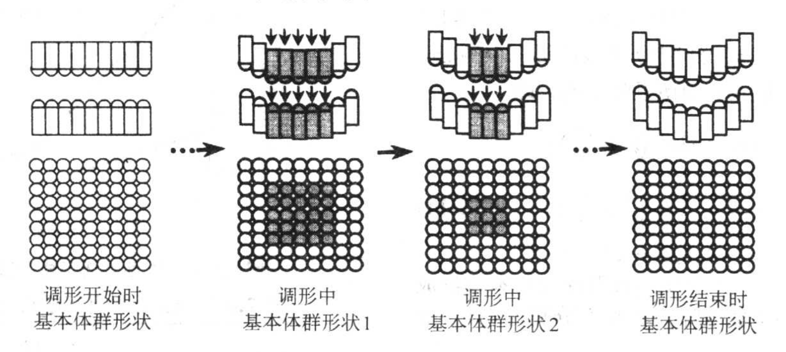


图7.2-29　并行式调形方式示意图

（2）调形机构

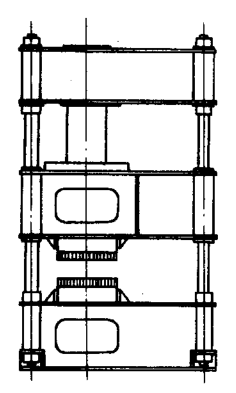


减速器以及转角检测装置等。控制单元接收上位计算机的控制指令和数据后，同时对各自的基本体进行高度调整。

3.2　多点成形主机

(1) 压力机的结构

多点成形压力机的主体往往采用液压机，其核心是上、下基本体群及基本体调形系统。多点成形压力机机架主要有三梁四柱式（闭式）、框架式与 C 形（开式）三种结构。图 7.2-32 所示为两种结构的机架。


(a) 三梁四柱式结构压力机

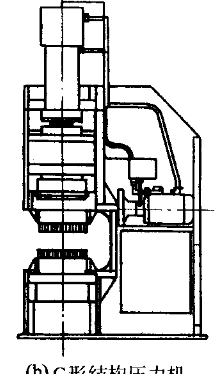

(b) C 形结构压力机

图 7.2-32　两种结构多点成形压力机机架

三梁四柱式压力机结构简单、质量轻、刚度与强度好。C 形结构的多点成形压力机也有其优点。利用多点成形的柔性特点，更有利于进行板料的分段成形，实现小设备成形大尺寸零件，这是传统板料成形方式无法实现的功能。压力机的操作空间越大，实现分段成形件的尺寸越大。与三梁四柱式机架压力机相比，C 形压力机加工的工件在宽度方向可分的段数更多，加工范围更大。因此，C 形（开式）机架结构对于分段成形更为有利。

(2) 液压加载系统

成形的动力由液压加载系统提供，加载系统主要由液压泵、溢流阀、单向阀、换向阀、液控单向阀、节流阀、充液阀及液压缸等组成，如图 7.2-33。换向阀 4 右电磁铁和换向阀 7、13 电磁铁给电，工作缸和上基本体一起快速下落，下落速度靠节流阀 6 调节；当位置传感器有信号后，电气系统控制换向阀 13 断电时，工作缸和上基本体一起由快速转为慢速成形阶段，板材开始变形，逐渐靠近目标形状，最后压靠为止。换向阀 4 左电磁铁和换向阀 13 电磁铁给电，工作缸和上基本体一起快速回程，停止在工作缸上限，一个工作循环结束。

3.3　CAD/CAM 软件

多点成形作为一种板料数字化成形技术，其成形过程是通过 CAD/CAM 一体化软件由计算机完成的。CAD 软件的主要功能包括：曲面造型、多点成形工艺计算、基本体群成形面设计以及工艺仿真、工艺检验等；CAM 软件主要根据 CAD 传送来的数据，调整基本体高度，构造基本体群成形面，同时把成形数据翻译成二进制码指令直接送到多点成形压力机的控制系统来控制压力机进行压制。

3.3.1　CAD 软件

(1) 曲面造型

多点成形涉及的三维曲面可分为规则曲面与自由曲面两种类型，规则曲面可由解析方程完全表达出来，比较容易处理，自由曲面则通过非均匀有理 B 样条（NURBS）来进行曲面造型。这样，针对不同的原始数据，形成了如下 4 种输入方法。

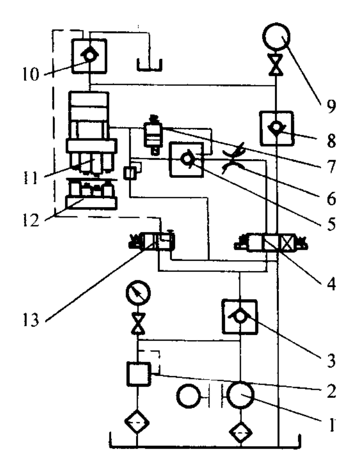


图 7.2-33　多点成形压力机液压工作原理

1—液压泵；2—溢流阀；3、8—单向阀；4、7、13—换向阀；5—液控单向阀；6—节流阀；9—压力表；10—充液阀；11—上基本体群；12—下基本体群

1) 网点坐标法——利用给定的网格数据点来生成插值曲面。

2) 截面轮廓线法——根据给定曲面上的若干截面线来生成曲面。

3) 四条边界法——利用四条边界曲线来生成曲面。

4) 规则几何形状法。

前三种方法是利用 NURBS 进行曲面造型，能够处理各种复杂形状，第四种方法利用普通解析方法进行曲面造型，能够快速准确地处理球形、马鞍形、扭曲形三种工程中常见的规则形状。图 7.2-34 是截面轮廓线法生成的曲面实例。

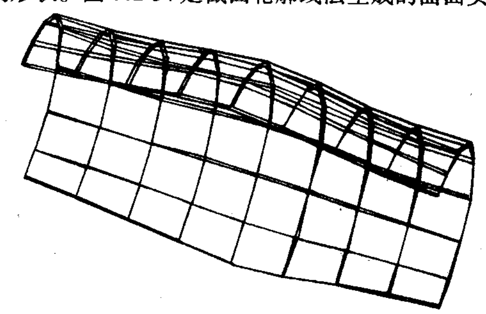


图 7.2-34　截面轮廓线法生成的曲面

(2) 多点成形工艺计算

1) 曲面展开与坯料计算。对于可展曲面，坯料可通过曲面展开来计算，但工程上实际应用的三维曲面零件多为不可展曲面，这种曲面的坯料计算通常采用两种方法：一种是几何映射法，另一种是基于三角形网格的坯料计算方法。

几何映射法是一种不可展曲面的近似展开方法。三维曲面由网格分成有限个小片，将每一小片映射到平面上，映射过程中要遵循以下原则。1. 体积保持不变。若成形过程中板料厚度不变，则应保持面积不变。2. 整个坯料表面连续，不出现裂缝或重叠。

在映射过程中每一网格根据上述原则进行调整，整个零件映射到平面上的几何形状就是所求的坯料。参见图 7.2-35，首先从网格中心点分别向四个方向展开两条中心线，这种展开只是简单地将每个点依次投影到平面上。这样就把整个网格划分成了四块。以右上块为例，对网格 A 来说，点 0、1、2 的位置是已知的，只有点 3 的位置是不定的。由四边形网格面积不变及展开后 23 线长度与 13 线长度之比与展开前

相应线长之比相等即可定出3点的位置。点3的位置确定后，对单元B来说，只有点5的位置是待定的，可利用同样的方法确定点5的位置。依此类推，按由下至上、由左至右的原则，右上块各点的位置就可完全确定下来。同理，也可确定其他三块上的每个点的位置，这样就展开了整个曲面。

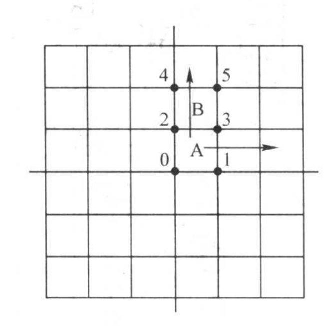


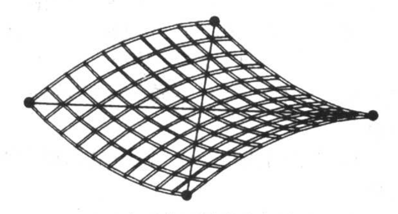
图 7.2-35 几何映射法曲面展开过程

2）成形位置确定 首先通过旋转和平移把工件调整到最佳成形位置，然后再进行下一步处理。最佳成形位置确定的原则如下。

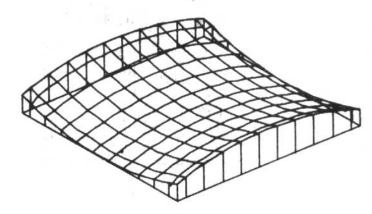
① 减少基本体总调整量，提高成形效率。

② 优化工件受力状态，避免压力机偏载。

一种简单的确定成形位置的方法按以下步骤进行：首先连接工件曲面的两对对角点（见图 7.2-36a），得到二条直线，然后对工件曲面进行旋转变换，使得这二条直线与基本体群的基准平面平行，可以得到整个曲面中心点的空间位置坐标，再对曲面进行平移变换，使曲面中心点与压力机的压力中心重合，这样就确定了工件的成形位置。实际应用表明，按上述方法确定成形位置各基本体的调整量比较均匀，进行多点成形时基本体受力也比较合理。图 7.2-36b 给出了一个马鞍面确定成形位置的应用实例。



(a) 成形位置的确定方法



(b) 成形位置的确定结果

图 7.2-36 马鞍面确定成形位置的实例

3）可成形性分析与工艺方案确定。根据多点成形设备的主要性能参数，对目标零件的可成形性进行分析，并确定工艺方案。主要考虑以下几方面。

① 压力机的最大可成形能力，如：额定成形力、可成形板料的最大长、宽尺寸、最大可成形板厚以及可成形曲面的高度差等；

② 压力机的最佳加工范围，如：一次成形的最大面积、最佳板料厚度等。

必要时需进行数值模拟，预测可能产生的成形缺陷及回弹。经综合分析来确定采用一次成形、分段成形、闭环成形还是采用压边多点成形等工艺。

4）回弹与弹性垫补偿计算。板料成形中不可避免地存在回弹现象，工艺设计时必须预测回弹量，并进行补偿，特别是在无压边情况下进行厚板、小变形量工件成形时，回弹补偿尤为重要。另外，采用弹性垫多点成形时，由于弹性垫对成形精度有影响，也需要在基本体群成形面造型时进行补偿。补偿量的计算主要依据经验数据或数值模拟结果。

5）曲面拓展与压边面设计。变形量比较大的薄板三维曲面零件成形时容易起皱，为消除起皱，必须采用压边技术进行多点成形。为实现压边，需要首先对零件的三维曲面进行拓展。曲面拓展需满足两个基本条件：

① 外拓曲面必须与原始目标曲面及压边面连续；

② 拓展部分的曲面与原始目标曲面之间要圆滑过渡。

基于 NURBS 的曲面拓展通常包括以下几个步骤。

① 压边面定位。在原始目标曲面边界的基础上，设计出与之相对应的压边面的边界。建立这种边界的对应关系是为了下一步生成拓展曲面作准备。一般以曲面的最大投影面为参考压边面，根据成形设备的压边圈尺寸，选择与原曲面之间合理的落差高度，设计板料曲面的压边面。

② 初始过渡曲面的生成。通过原始目标曲面的边界与压边面的边界的对应关系，生成这一对曲线之间的一片初始拓展面。

③ 控制点的调整。初始过渡 NURBS 曲面与目标曲面之间只有位置上的连续性，这种过渡曲面是不能满足实际需要的，必须调整初始过渡曲面与目标曲面公共边界处的控制点，使公共边界上有相同的切平面，并保证 G^2 连续性，使之与目标曲面光滑过渡。

④ 外拓曲面的调整。调整外拓曲面，使之与设备的压边曲面光滑拼接。

图 7.2-37 所示为医学工程上人脑颅骨修复体曲面成形中曲面拓展与压边面设计的应用例。该曲面件的厚度 0.1 mm，如果采用无压边方式直接成形，极易起皱，采用压边技术可抑制这种缺陷的产生。因此需要将目标曲面拓展，设计出压边面，以实现压边拉延成形。图中给出的是拓展后带压边面的曲面线框图，实现了目标成形曲面与压边面及它们之间过渡曲面的圆滑过渡。

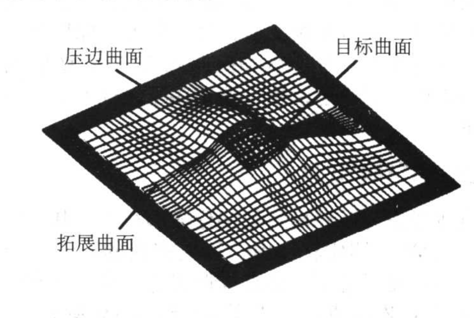


图 7.2-37 脑颅骨修复体曲面成形应用例

（3）基本体群成形面设计

基本体群成形面设计是 CAD 软件的核心工作与最终目的。成形面设计的基本内容是根据确定的工艺方案及各种工艺参数进行成形面曲面造型，并计算出各基本体的高度方向位置坐标。

多点成形的成形面是由基本体球头组成的包络面，因此，需要首先计算出基本体球头与目标曲面的公切点，从而确定各基本体的高度。设目标曲面的上表面方程为



$p=p(u, v)$，板料的厚度为 t，基本体的球头半径为 r，如图 7.2-38 所示。

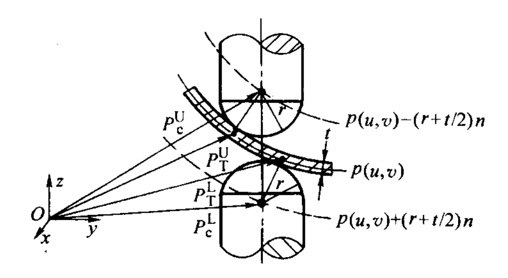


图 7.2-38　基本体高度位置计算示意图

上、下基本体球头的球心所在方程为

$$\begin{cases} p(u,v)+(r+t/2)n=p_c^U \\ p(u,v)-(r+t/2)n=p_c^L \end{cases} \tag{7.2-17}$$

其中，n 是曲面在点 $p(u, v)$ 处切平面的单位法矢

$$n(u,v)=\frac{p_u(u,v)\times p_v(u,v)}{|p_u(u,v)\times p_v(u,v)|} \tag{7.2-18}$$

p_c^U、p_c^L 分别为上、下基本体球头的球心位置向量 $p_c^U=(x_c^U, y_c^U, z_c^U)^T$、$p_c^L=(x_c^L, y_c^L, z_c^L)^T$。

由于基本体球心的 x、y 坐标已知，由方程（7.2-17）可求得基本体球心 z 坐标及公切点 $p_T^U(x_T^U, y_T^U, z_T^U)$ 与 $p_T^L(x_T^L, y_T^L, z_T^L)$。

1）规则曲面　参数方程如下：

$$\begin{cases} x=u \\ y=v \\ z=F(u, v) \end{cases} \tag{7.2-19}$$

切平面的单位法矢

$$n=\left(\frac{F'_u}{\sqrt{F'^2_u+F'^2_v+1}},\frac{F'_u}{\sqrt{F'^2_u+F'^2_v+1}},\frac{-1}{\sqrt{F'^2_u+F'^2_v+1}}\right)^T \tag{7.2-20}$$

上、下单元体球心坐标 z_c 为

$$z_c=F(x,y)\mp\left(r+\frac{t}{2}\right)/\sqrt{F'^2_x+F'^2_y+1} \tag{7.2-21}$$

其中的切点坐标 x_T、y_T 由如下方程求解

$$\begin{cases} x_c=x\pm\left(r+\frac{t}{2}\right)F'_x/\sqrt{F'^2_x+F'^2_y+1} \\ y_c=y\pm\left(r+\frac{t}{2}\right)F'_y/\sqrt{F'^2_x+F'^2_y+1} \end{cases} \tag{7.2-22}$$

2）不规则曲面　将 NURBS 曲面转化成分片有理 Bezier 曲面。由于 Bezier 曲面具有规则的表达式，不存在递推过程，这就大大提高了计算速度。因此，在基本方程的推导过程中，实际上曲面的表达形式是分片有理 Bezier 曲面方程：

$$p(u,v)=\frac{p^*(u,v)}{w(u,v)}=\frac{\sum_{j=0}^{n}\sum_{i=0}^{m}\omega_{j,i}b_{j,i}B_{i,k}(u)B_{j,l}(v)}{\sum_{j=0}^{n}\sum_{i=0}^{m}\omega_{j,i}B_{i,k}(u)B_{j,l}(v)} \tag{7.2-23}$$

其中 $b_{j,i}$，$\omega_{i,j}$（$i=0、1、\cdots\ m$，$j=0、1、\cdots n$）分别为曲面控制顶点及与控制顶点相联系的权因子；$B_{i,k}(u)$ 和 $B_{j,l}(v)$ 为 Bernstein 基函数，其递推形式为

$$B_{i,n}(u)=\begin{cases} C_n^i t^i(1-t)^{n-i} & i=0,1,\cdots,n \\ 0 & 其他 \end{cases} \tag{7.2-24}$$

此时式（7.2-18）中导矢计算公式为

$$\begin{cases} p_u(u,v)=[P_u^*(u,v)-w_u(u,v)p(u,v)]/w^2(u,v) \\ p_v(u,v)=[P_v^*(u,v)-w_v(u,v)p(u,v)]/w^2(u,v) \end{cases} \tag{7.2-25}$$

其中

$$p_u^*(u,v)=\sum_{j=0}^{n}\sum_{i=0}^{m}\omega_{j,i}b_{j,i}\dot{B}_{i,k}(u)B_{j,l}(v),\ w_u(u,v)=\sum_{j=0}^{n}\sum_{i=0}^{m}\omega_{j,i}\dot{B}_{i,k}(u)B_{j,l}(v)$$

$$p_v^*(u,v)=\sum_{j=0}^{n}\sum_{i=0}^{m}\omega_{j,i}b_{j,i}B_{i,k}(u)\dot{B}_{j,l}(v),\ w_v(u,v)=\sum_{j=0}^{n}\sum_{i=0}^{m}\omega_{j,i}B_{i,k}(u)\dot{B}_{j,l}(v)$$

表 7.2-6 给出了几种典型的多点成形工艺成形面设计包含的内容及需要考虑的问题。

表 7.2-6　典型多点成形工艺的成形面设计

多点成形工艺	成形面设计的方法	成形面几何补偿包含的内容	成形面设计的内容
一次成形	基于目标形状	回弹、弹性垫	只进行一次成形面设计
分段成形	基于过渡区曲面设计结果	回弹、弹性垫	每段成形都需设计有效成形区成形面与过渡区成形面
多道成形	基于成形路径优化设计结果	回弹、弹性垫	每道成形都需设计成形面
反复成形	基于每次反复成形的变形量设计结果	回弹、弹性垫	每次反复成形都需设计成形面
闭环成形	基于成形面修正量的计算结果	回弹、弹性垫	每次成形都需修正成形面
薄板压边成形	基于曲面延拓与压边面设计结果	回弹、弹性垫	只进行一次成形面设计

3.3.2　CAM 软件

CAM 软件的主要功能是根据 CAD 软件设计的工艺方案及成形面的有关数据，驱动控制系统，调整基本体高度，为零件成形构造出所需基本体群成形面。结合两种基本调形方式，有串行式与并行式两种 CAM 软件结构。

（1）串行调形方式的 CAM 软件

串行调形方式的软件流程图如图 7.2-39 所示。其流程如下。首先读入目标成形面的数据，然后进行功能选择。如果要求手动调形，则进入手动控制状态；如果自动调形，则首先使机械手自动复位，然后按机械手行、列工位进行循环。对于每个调形工位，需要通过 x、y 方向的移动来调整机械手的位置；每个基本体的高度调整量通过电机转动的角度来控制。每个基本体的高度调整由三个基本步骤完成：电磁离合器吸合（调形开始）、伺服电机转动（调形）、电磁离合器分开（调形结束）。一个调形工位的基本体调形结束后进入下一个工位，对所有基本体循环一次，即完成了基本体群成形面的曲面造型。

（2）并行调形方式的 CAM 软件

并行调形方式的软件流程图如图 7.2-40 所示，由顺序执行的两段循环程序构成。这两段循环程序分别为控制指令的发送和对控制单元状态的查询。其流程如下。

1）控制指令发送。上位机读入目标成形面、当前成形面数据及控制单元地址表，计算出每个基本体的高度调整量

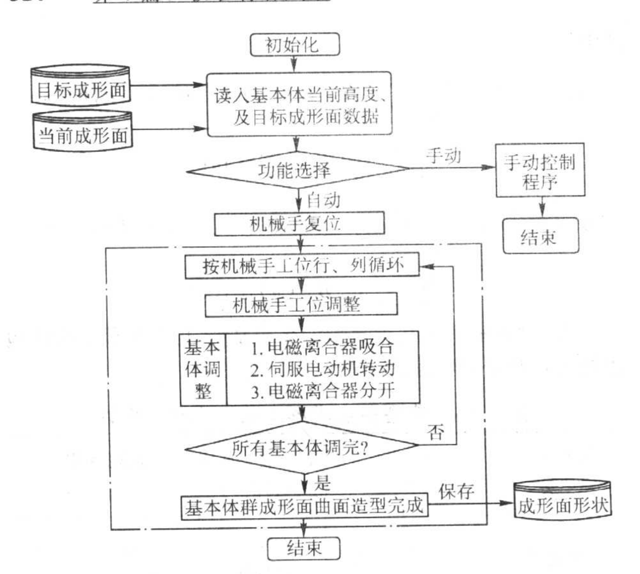
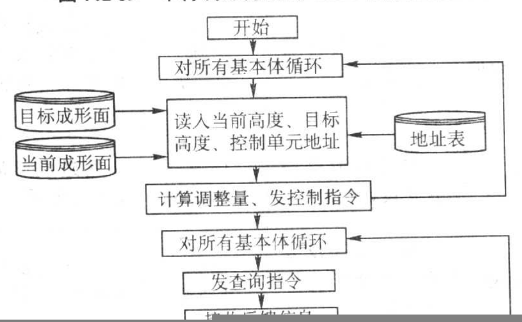


图 7.2-39 串行调形方式的 CAM 软件的流程图



并转化成脉冲个数，依次向每个基本体的控制单元发出控制指令。控制单元接收到控制指令后，立即按指令所规定调整量驱动调形电机对基本体高度进行调整。虽然控制指令是对每个控制单元依次发送的，但由于发送过程是电信号的传输，每个控制单元接收到控制指令的时间差异实际上非常小，对于机械动作而言，所有基本体的调整几乎是同时开始的。

2）控制单元状态的查询。当所有基本体都开始调整后，上位机再以循环方式依次向每个基本体的控制单元发出状态查询指令。控制单元接到查询指令后，将运行状态向上位机反馈。如果查询的反馈信息显示调整量超差，上位机再次对这些控制单元发出修正偏差的指令。这一循环查询操作将一直持续下去，直到所有的基本体都调整到目标高度为止，最后将各个基本体的高度值保存起来。查询指令的发送及控制单元状态的反馈，均是电信号的传输，因此，对基本体偏差的修正动作也是同时进行的。

3.4 设备规格与应用

长春瑞光科技有限公司已经开发出多种不同规格的多点成形压力机，实现了从薄板到厚板多点成形用压力机的系列化工作。多点成形压力机的规格及主要性能参数如表 7.2-7，图 7.2-41 为几种成形件照片。

表 7.2-7 多点成形压力机的规格及主要性能参数

型号	YAM－1	YAM－3	YAM－5	YAM－10	YAM－20	YAM－40
最佳板料厚度/mm	1	3	5	10	20	40
可成形板料厚度/mm	0.4～2	1.2～6	2～10	4～20	8～40	16～80
板料宽度	[illegible]	<0.4	<0.8	<1.2	<2.0	<4.0

表 7.2-8 为已开发的几种多点成形设备例。

表 7.2-8　多点成形设备例

型号	主要性能特点	基本体群参数	设备照片	已应用情况
小型压力机	额定成形力：50 kN 基本体调整量：50 mm 可加工板料厚度：0.5～3 mm	基本体布置：10×10 一次成形尺寸：140 mm×140 mm		建筑装饰件、各种曲面分段成形
YAM－5 型	额定成形力：2 000 kN 基本体调整量：200 mm 可加工板料厚度：2～10 mm C 型结构便于分段成形	基本体布置：28×20 一次成形尺寸：840 mm×600 mm		流线型车头覆盖件成形、船体外板成形
YAM－3 型	额定成形力：630 kN 基本体调整量：100 mm 可加工板料厚度：0.5～5 mm 具有压边功能，可用于薄板成形	基本体布置：40×32 一次成形尺寸：400 mm×320 mm		人脑颅骨修复体成形、薄板件成形
YAM－3C 型	额定成形力：200 kN 基本体调整量：100 mm 可加工板料厚度 1.2～6 mm 基本体群快速调形	基本体布置：16×12 一次成形尺寸：416 mm×312 mm		各种鞍形、球形、扭曲形件成形

4　增量成形技术

4.1　基本原理

增量成形工艺是一种通过数学控制设备，采用预先编制好的控制程序逐点成形板壳类件的柔性加工工艺。轴对称零件的增量成形可借助数控车床实现，非轴对称零件则可借助数控铣床或专用的数控设备进行增量成形。

（1）轴对称件的增量成形

利用数控车床进行增量成形时，首先将数控机床的切削刀具换成成形工具，再将板料用压板在机床上压紧，使板料随机床主轴旋转，利用数控车床的进给系统，使成形工具的



球头按照一定的顺序向板料施加作用力，使板料按照给定的轨迹逐步成形，最终达到所需要的形状，如图 7.2-42 所示。

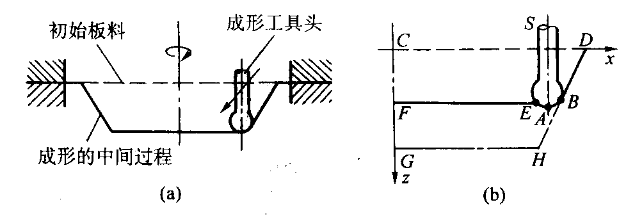


图 7.2-42 在数控车床进行增量成形的示意图

成形过程可简化成如图 7.2-42b 所示的形式，*S* 表示成形工具头，*CD* 表示成形前的板坯，*GHD* 表示板料最终成形的形状，*DB* + *BE* + *EF* 表示中间成形过程。在成形过程中板料上的 *AB* 之间的质点会被成形球头胀形至最终成形轮廓。由于 *AB* 上的外法线方向均指向 *SA* 的右侧，所以板料上与成形球头相接触的质点，如质点 *A* 在受 *z* 方向胀形力作用的同时，也受 *x* 方向的胀形力作用，并最终被胀形至成形轮廓 *HD*。因此，板料上的质点在成形过程中其 *x* 和 *z* 的坐标绝对值都会增大。

（2）三维非轴对称件的增量成形

这种成形方法引入了分层制造的思想，将复杂的三维形状沿 *z* 轴方向离散化，分解成一系列二维断面层，并在这些二维断面层的局部进行塑性加工，如图 7.2-43 所示。

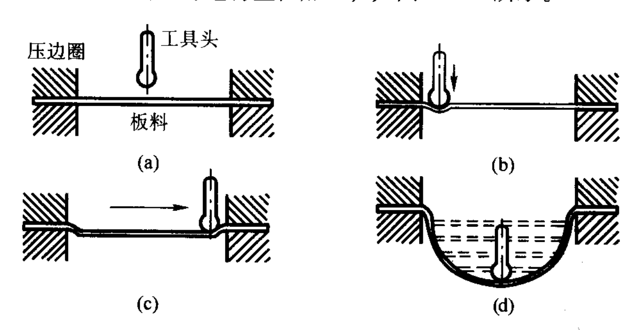


图 7.2-43 三维曲面的分层增量成形示意图

板材加工时，成形工具先走到指定位置，并对板料压下设定的压下量，然后根据控制系统的指令，按照第一层截面轮廓的要求，以走等高线的方式对板料进行塑性加工，形成所需第一层截面轮廓后，成形工具头压下设定高度，再按第二层截面轮廓要求运动，并形成第二层轮廓，如此重复直到整个工件成形完毕。

利用数控车床进行轴对称件增量成形时，板料随卡盘旋转，成形工具则按预定程序作进给运动，工具的球头部分作用于板料表面使作用点处产生塑性变形，由于板料本身作旋转运动，因而成形出轴对称件。

在数控铣床上进行增量成形时，板料随工作台沿 *x*、*y* 方向作平移运动，成形工具除作旋转运动外还沿垂直方向运动，板料沿球头轨迹包络面被胀形，形成三维非轴对称零件，如图 7.2-44。

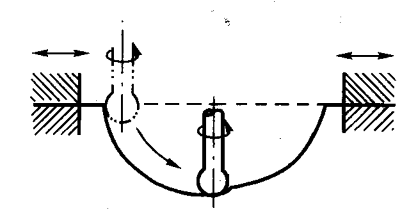


图 7.2-44 在数控铣床上进行增量成形的过程示意图

板料增量成形系统的基本结构原理如图 7.2-45 所示，主要由移动工具头、导向装置、板料压板、支撑座和工作台等组成。移动工具头在数控系统的控制下进行三轴联动，支撑座起支撑板料的作用。对于形状复杂的零件，该支撑座可制成简单的模芯，有利于板料的成形。板料被夹持在压板上，该压板能够沿固定导向装置沿 *z* 轴上下移动。

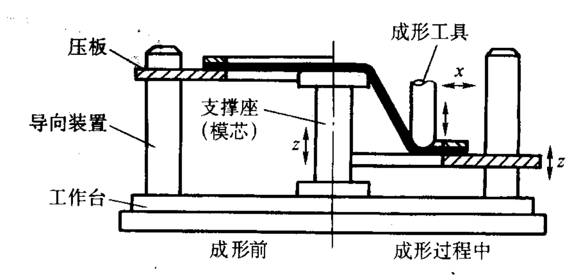


图 7.2-45 增量成形系统结构原理示意图

成形时，被加工板料置于支撑座上，其四周用压板夹紧。数控系统按设定的程序控制工具头下降一个步距，再沿事先设定好的轨迹运动，同时板料随压板一起下降一个相同步距。成形完成一层后，移动工具头横向移动一个步距，然后沿 *z* 轴下降一个步距进行下一层的成形，如此循环，最后将板材逐步压靠在模芯上，获得最终零件。

（3）变形特点与成形轨迹设计

增量成形时成形球头首先在一点压向板料，使之产生一定的变形，然后按一定的轨迹运动，在整个运动过程中板料连续变形，待完成一条路径的变形运动后，将成形球头抬起，移向下一条轨迹的起点，重复以上的运动。可见，板料的整体变形是由逐次的变形累积而成的，在沿指定轨迹连续成形的方式下，成形球头压入板料，变形主要发生在球头运动轨迹的前侧，局部变形具有"胀形"的特征。

增量成形过程有两个主要特点：一是板材要按照给定的路径或轨迹进行成形；二是板料的变形是逐点、逐步发展的，因此每一点、每一步的变形量不能太大。因而对增量成形工艺来说，要解决的关键问题就是工具头的成形轨迹问题，即原始板料应当按照什么样的变形次序达到最终的形状，这也是数控程序设计必须解决的问题。

根据增量成形的特点，在成形工艺的轨迹设计时应遵循以下原则。

1）变形的均匀化原则。板料在成形之后，成形件上各点的变形程度应尽可能地均匀。实际上均匀化的原则也适用于一般的板料成形工艺，只是由于受到工艺条件的限制，成形后均匀化的程序不同。从理论上讲，增量成形可以对板料上任何一点的变形进行控制，因此，能够较好地控制板料成形的均匀化程度。但是，在实际增量成形过程中，由于事先预测变形比较困难，而且还由于边界条件对变形的影响等原因，变形均匀化也只能在某种程度上实现。

2）板料中面内的压应力最小原则。板料在增量成形过程中，对板料的加载应尽量避免压应力的产生。这一原则主要是从防止板料整体失稳考虑的。在成形工具沿成形轨迹连续运动时，如果初始的压下量过大，将使后续的成形在板料的中面内产生过高的压应力，从而导致失稳并产生折叠。

4.2 成形分析与实验

（1）增量成形中的厚度变化

增量成形是以板料的厚度减薄、表面积增大为主要变形特征的。根据体积不变条件，可以得到成形件壁厚与倾角的关系，如图 7.2-46。

由体积不变条件得

$$l_0 t_0 = l_0 t/\sin\alpha \tag{7.2-26}$$

从而得到厚度减薄的正弦规律

$$t = t_0 \sin\alpha \tag{7.2-27}$$

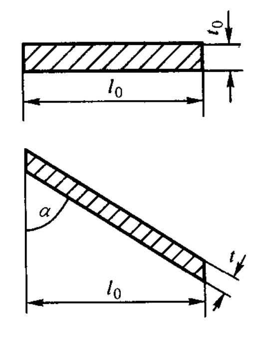


图 7.2-46　不同倾角的成形件侧壁变薄示意图

表 7.2-9 给出了 Hirt 棱锥台形曲面件厚度减薄的实验结果（板料厚 1.5 mm）：

表 7.2-9　棱锥台形曲面件壁厚的计算与测量值

α	正弦规律计算的板厚 /mm	板厚的测量值 /mm
40°	1.15	1.14
60°	0.75	0.77

Hirt 等应用商业软件 ABAQUS 显式程序对侧壁倾角为 47°的棱锥台形曲面件增量成形过程进行了数值模拟，并与实验结果进行了对比如图 7.2-47 所示。

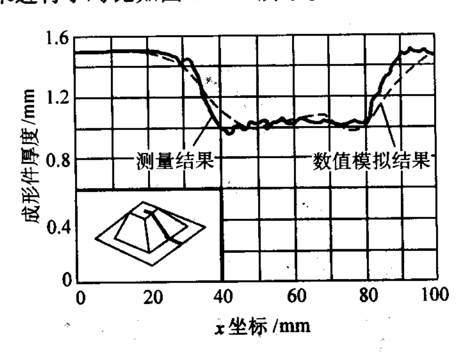


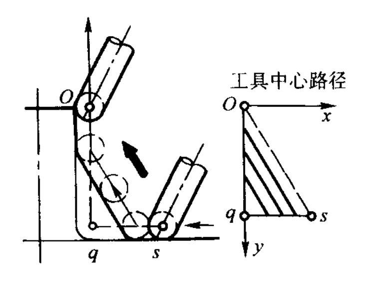
图 7.2-47　锥台形曲面件壁厚测量结果与实验结果

(2) 数控车床上的柱面壳成形

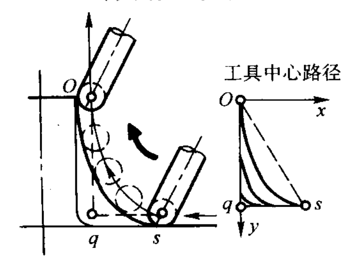
在 CNC 车床上成形柱面壳使用的成形工具为带有球头的圆柱体，可以自由地摆动到所需要的角度。在板料旋转运动的同时，成形工具沿轴向及圆周方向运动，这样使板料沿工具的包络面成形。Kitazawa 等人使用的实验材料为硬铝板，厚度分别为 0.6 mm 和 1.0 mm。实验样件的坯料为宽 180 mm 的方板。目标圆柱面的高度为 20 mm，直径分别为 20 mm 和 40 mm。板料的旋转速度为 300 r/min，成形工具的球头直径为 8 或 10 mm，工具的运动速度在锥面成形阶段为 0.7 mm/s，在圆柱面成形阶段分别为 0.28 mm/s、0.7 mm/s 和0.98 mm/s。在成形过程中成形工具倾斜，与壳面轴线的夹角为 15°。

成形采用了两种工具路径：一种是平行直线路径（如图 7.2-48a），另一种是幂曲线路径（如图 7.2-48b）。

图 7.2-49 给出了工具路径对柱面壁厚的影响。对于幂曲线工具路径，壁厚分布的特征是，越接近法兰处厚度越小，在法兰边 B 点壁厚达到最小值。对于平行直线工具路径，厚度基本上保持常数与正弦规律变化比较吻合。这些结果表明，工具路径是控制柱面壁厚的重要因素。



(a) 平行直线路径



(b) 幂曲线路径

图 7.2-48　工具路径

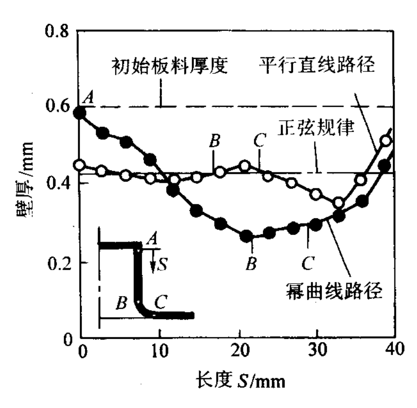


图 7.2-49　工具路径对壁厚的影响

(3) 成形件几何精度的实验

为考察增量成形中 z 方向进给量、工具直径以及成形路径方向等对成形件几何精度的影响，Hirt 等人采用图 7.2-45 所示的成形装置，对矩形棱锥台形曲面件进行了增量成形实验。实验结果如下。

1) 当侧壁倾角为 47°时，即使采用简易的模芯也能成形出与目标形状非常吻合的棱锥台面成形件，如图 7.2-50。

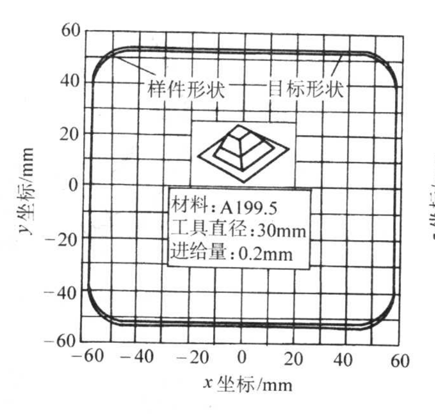
2) 当侧壁倾角为 65°时应变接近于低碳钢的可成形极限，棱锥台面成形件的侧表面出现鼓起。对于工具路径都是同方向的成形方式（样件 1），所产生的鼓起是不规则、不对称的，但工具路径方向交替变化的成形方式（样件 2），所产生的鼓起则是对称的，如图 7.2-51 所示。

4.3　成形设备

(1) CNC 车床

采用 CNC 车床可进行轴对称件的增量成形，如图 7.2-52 所示。在成形前，首先将板料用压板在机床上压紧，底部留有一定的空间以容纳板料的变形，将数控机床的切削刀具换成成形工具。成形时板料随机床主轴旋转，成形工具头按数控指令沿轴向和径向与板料进行相对运动并形成球头轨迹包络面，与此同时，板料也被胀形至该球头轨迹包络面上而成形。





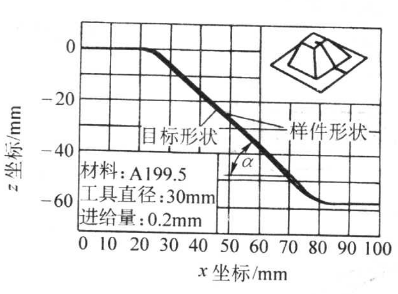
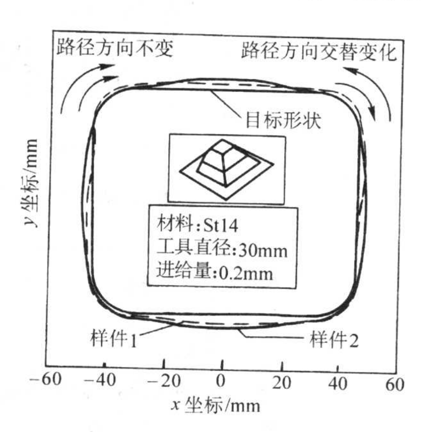


图 7.2-50 样件与目标形状的对比（侧壁倾角为 47°）



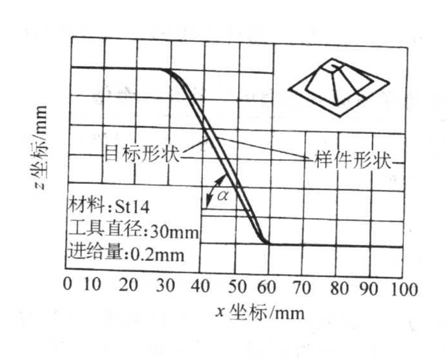


图 7.2-51 样件与目标形状的对比（侧壁倾角为 65°）

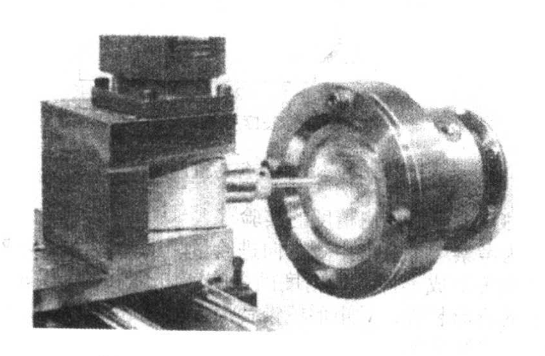


图 7.2-52 采用 CNC 车床的增量成形

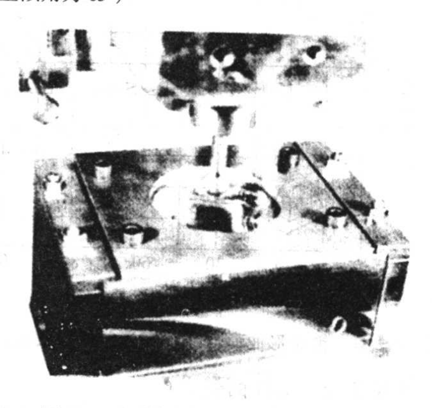


图 7.2-53 采用 CNC 铣床的增量成形

（2）CNC 铣床

三维非轴对称板材零件增量成形可在加工中心（数控铣床）上进行，如图 7.2-53 所示。在成形前，首先将板料用压板在工作台上压紧，底部留有一定的空间以容纳板料的变形，将加工中心的切削刀具换成成形工具。成形时板料随工作台一起按数控指令沿加工中心的 x 和 y 方向移动，工具由加工中心的 z 轴夹持，一定速度旋转并沿 z 轴方向移动，板料沿球头轨迹包络面被胀形。

（3）增量成形专用设备及规格参数

1）设备结构。松原茂夫设计了专用增量成形装置，如图 7.2-54 所示。该装置主要包括工具组及与该工具组协同工作的加压机构，以及使上述工具组和加压机构在 x、y 轴方向及 z 轴方向作相对移动用的多轴数控驱动装置。工具组包括底座、固定加压机构、板料夹持机构和板料压紧机构。

第一工作台与第二工作台分别由数控驱动装置（直流伺服电动机或直线电动机）控制，沿 x、y 两个方向进行移动；滑块安装在门形框架上，由数控驱动装置控制沿 z 方向进行移动。

固定加压机构设置在第二工作台的中央，顶部安装有与要成形件的底部轮廓一致的顶板模具（该模具可以根据成形件形状更换）。

板料夹持机构由安装在底座上的若干根支柱组成，分布在顶板模具周围，能沿 z 轴方向移动的支撑板，其升降由气缸或油缸组成的制动器控制。

板料压紧机构通过压紧板与支承板一起在厚度方向沿四周边缘夹持板料，压紧板的压紧力通过压紧用的制动器来控制。

加压工具安装在固定于滑块的夹持器上，随同滑块在 z 轴方向上下运动；通过加压机构与顶板模具的协同工作，进行板料的逐次成形。

2）设备规格与主要参数。日本 AMINO 公司已实现了增量成形设备的系列化，开发了专用软件 AFS（Aminio Forming System）。设备主要分成 RA、RB 与 PA、PB、PC 两大类五



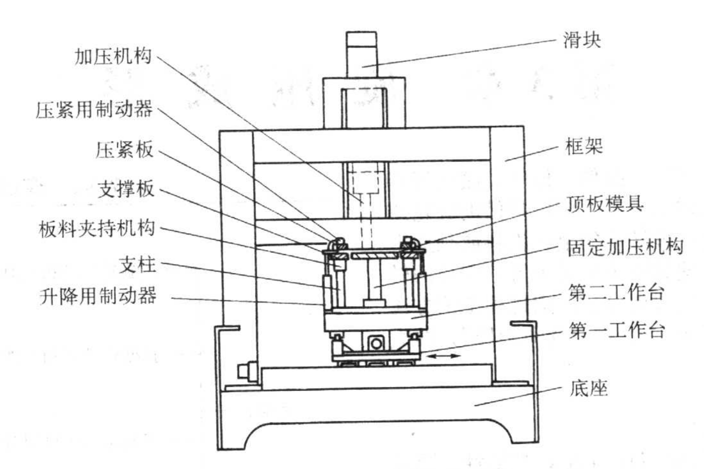


图 7.2-54　增量成形装置

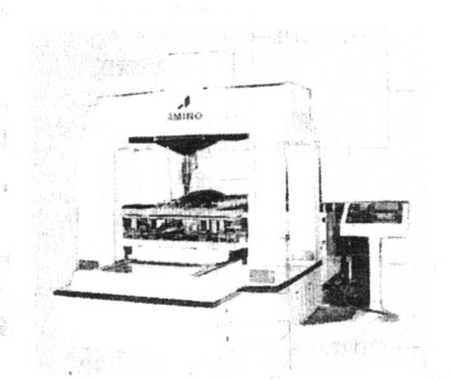
种型号（如图 7.2-55），设备的主要参数如表 7.2-10 所示，　图 7.2-56 为这些设备的部分成形件照片。

表 7.2-10　日本 AMINO 公司生产的增量成形设备主要参数

型号	DLNC－RA	DLNC－RB	DLNC－PA	DLNC－PB	DLNC－PC
最大板料尺寸/mm	400×400	600×600	1 100×900	1 600×1 300	2 100×1 450
最大成形尺寸/mm	300×300	500×500	1 000×800	1 500×1 200	2 000×1 350
最大成形深度/mm	150	250	300	400	500
x 方向行程/mm	330	550	1 100	1 600	2 100
y 方向行程/mm	330	550	900	1 300	1 450
z 方向行程/mm	200	300	350	450	550
最大压边尺寸/mm	500×500	750×950	1 300×1 100	1 800×1 500	2 300×1 650

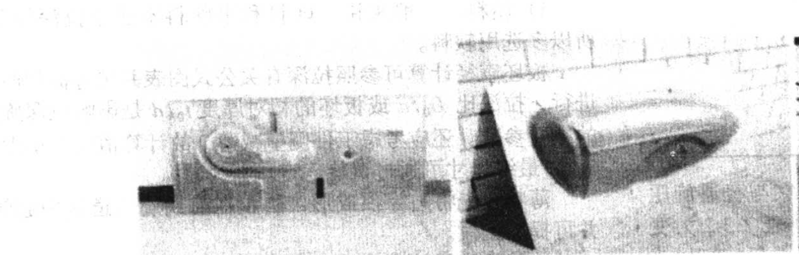


(a) RA、RB 型增量成形设备



(b) PA、PB、PC型增量成形设备

图 7.2-55　增量成形设备



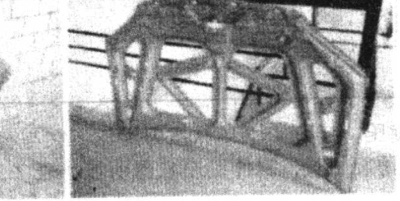


图 7.2-56　部分增量成形件照片

编写：李明哲（吉林大学）
蔡中义（吉林大学）



第3章　旋压成形

旋压是一种综合了弯曲、挤压、拉伸、横轧及滚压等多种工艺特征的板料少或无切削加工工艺。旋压是借助旋轮或擀棒、压头等工具，对随同旋压模转动的金属板料或预成形坯料作进给运动并施加压力，使其逐步成形为薄壁空心回转体制件的工艺过程。按照我国的习惯说法，把这种工艺方法分为"普通旋压"和"强力旋压"（又称"变薄旋压"）两大类，统称为"旋压"。

（1）旋压工艺的特点

旋压工艺有如下几个特点。

1）在旋压过程中，由于旋轮与坯料近似点接触，因此单位压力较大，适于加工高强度难变形材料，而且所需总变形力较小。

2）旋压时金属纤维连续完整，使得旋压制品强度提高。

3）强力旋压可使旋压件达到较高的尺寸精度和表面粗糙度。

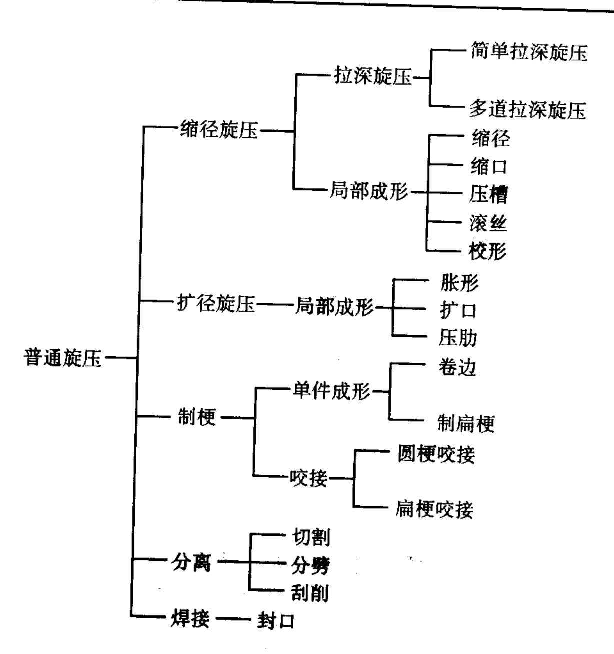
4）旋压工艺能使其他工艺难以成形的零件得以成形，应用范围广。

5）材料利用率高，节省工时，降低成本。

（2）旋压工艺的分类

1）普通旋压。普通旋压可以用简单的设备和模具制造出形状复杂的零件，生产周期短，适于小批量生产，还可用于制造有凸起或凹进形状的复杂空心零件。表7.3-1为普通旋压工艺的分类。

表7.3-1　普通旋压分类



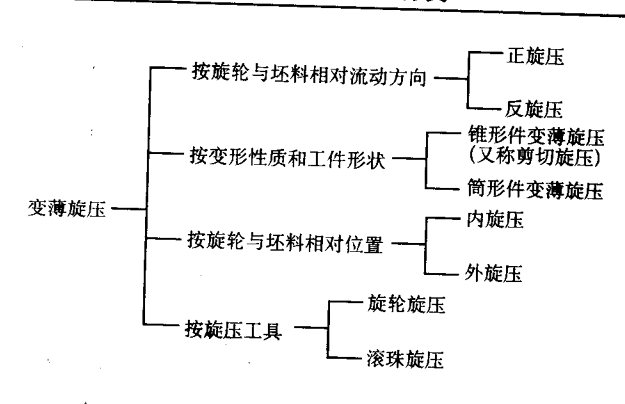
2）变薄旋压。变薄旋压又称强力旋压，它与普通旋压的区别在于变薄旋压时，制件壁厚减薄明显。表7.3-2为变薄旋压的分类。

1　普通旋压

1.1　普通旋压的应用

普通旋压有手工旋压、半自动旋压及自动旋压。在中、小批量生产时，一般情况下采用普通旋压要比采用拉深工艺的经济效益好。对于形状复杂的工件其经济效益更为显著。

表7.3-2　变薄旋压分类



普通旋压可以完成的各种工序如图7.3-1所示。普通旋压除了可以完成复杂型面的成形以外，还能完成一些切割与连接工作。

传统的手工旋压适于中、小批量生产，宜采用薄、软的金属板料，最大坯料厚度参见表7.3-3。半自动或自动旋压则能用于中、小批量的生产，可以采用厚、硬的金属板料。

普通旋压时应选用延展性好、加工硬化指数低、杂质少、组织均匀的材料。纯铝及3A21旋压性最优，2A12及低碳钢良好，5A03及5A06差。不锈钢最好进行加热旋压。

表7.3-4列出了一些常用材料对普通旋压的适应性。

普通旋压件的直径公差一般可达到直径的0.5%，有时可达到直径的0.1%～0.2%。表7.3-5列出了普通旋压件的直径精度。

1.2　普通旋压的工艺参数

影响旋压工艺的因素主要有坯料、工艺及工艺装备等。坯料、工艺及工艺装备选配合理，可以保证旋压过程中坯料不起皱、不破裂，成形工件具有较高的尺寸精度和表面粗糙度，使整个旋压加工过程有较好的技术经济性。

（1）拉深旋压

拉深旋压与拉深成形类似，但由于靠旋轮的运动来控制工件，所以比拉深成形加工时自由度更大，能制出形状复杂的回转对称体。

1）坯料。一般来讲，硬料和半硬料不适于拉深旋压，所以多选用软料。

板坯直径计算可参照拉深有关公式图表并按等面积原则进行，拉深比 D_0/d 或板坯的相对厚度 t_0/d 是影响拉深旋压的主要参数。还应考虑工件侧壁减薄，故计算值应减小大约5%，最终尺寸可通过试旋确定。

薄料宜先将边缘预成形，防止在前期旋压道次中起皱，并可提高工效。

冲裁的坯料外缘比剪切的整齐，有利于防止旋压中边缘开裂。

2）道次数与旋轮运动轨迹。简单拉深旋压的极限拉深比小，所以其应用范围有限。对于拉深比比较大的深圆筒件或其他形状复杂的工件需采用多道次拉深旋压。

铝及低碳钢杯形件采用简单拉深旋压（单道次，单向进

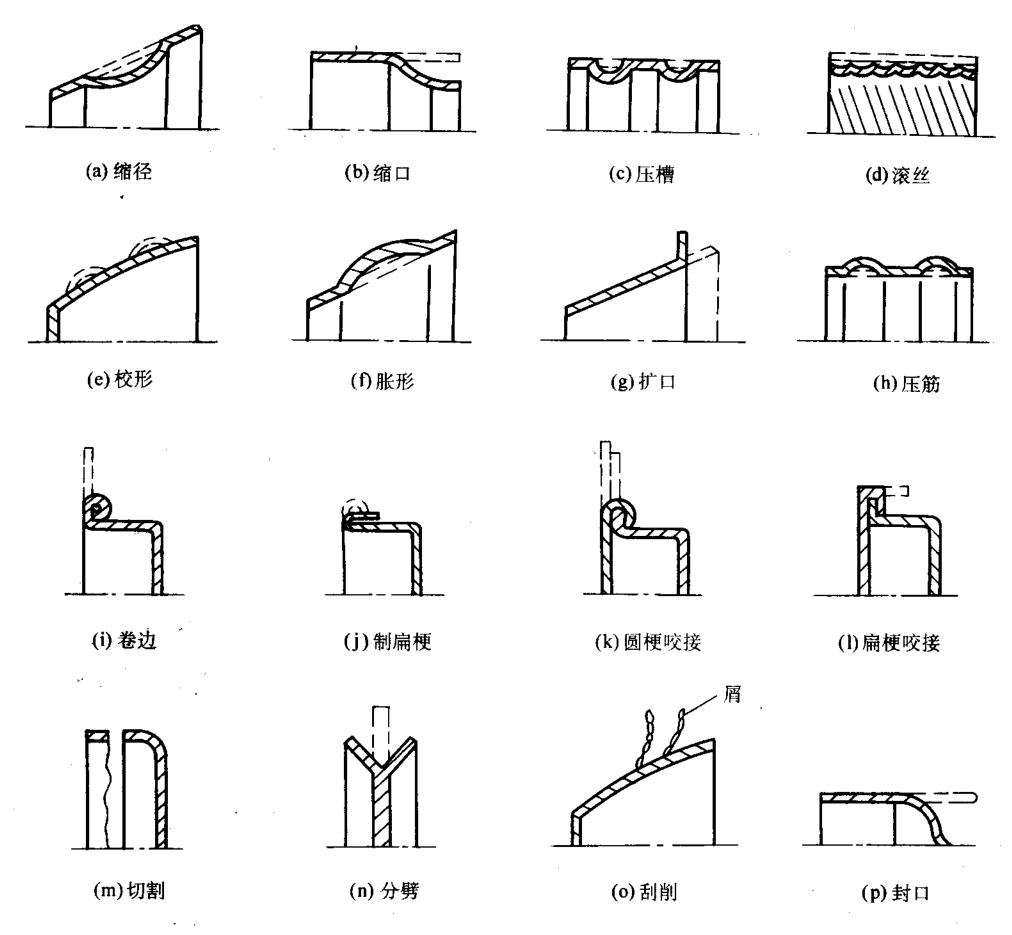


图 7.3-1 普通旋压可完成的工序

------坯料 ——工件

表 7.3-3 手工旋压可加工厚度 mm

工序	材料			
	铝	紫铜	软钢	不锈钢
成形	3~4	3	2	1.35
咬接	1	—	0.7	—

表 7.3-4 常用材料对普通旋压的适应性

对普通旋压的适应性	适应性优良	适应性较好	适应性较差	适于加热旋压
材料种类	纯铝、金、银、铝-锰系铝合金、紫铜	铝-镁-锰系铝合金、黄铜、低碳钢	高镁含量的铝-镁系铝合金	难熔金属钛合金

表 7.3-5 普通旋压件直径精度 mm

工件直径		<610	610~1 220	1 220~2 440	2 440~5 335	5 335~6 605	6 605~7 915
直径精度	一般	±0.4~0.8	±0.8~1.6	±1.6~3.2	±3.2~4.8	±4.8~7.9	±7.9~12.7
	特殊	±0.02~0.12	±0.12~0.38	±0.38~0.63	±0.63~1.01	±1.01~1.27	±1.27~1.52

给）的条件是相对厚度（工件厚度与直径比）$t/d>0.03$，旋压系数（坯料与工件的直径比）$D_0/d\leqslant 1.8\sim1.85$，并采用型面适宜的旋轮（见表 7.3-14）。

多道次拉深旋压时旋轮运动轨迹可取多种形式。一般而言，利用往程成形易使壁部拉薄，法兰起皱；采用回程成形易使壁部增厚。

当工件内壁带有装饰性或功能性凸起、凸点、凸字时，则过渡道次只能接近最终旋压模，而在末道次中一次贴靠。凸起高度一般为（0.2~0.4）t。

在半自动旋压机上或利用计算机编程进行多道次拉深旋压时，可由一活动靠模板逐次移位来确定旋轮运动轨迹（图 7.3-2），旋轮运动轨迹宜采用渐开线型。

以旋铝筒为例（图 7.3-3），可按下列步骤确定渐开线线形轨迹。

① 设定 x_m。

② 求基圆半径

$$a=(1.7\sim2.2)(h+x_m-t_0) \tag{7.3-1}$$

a 过大则道次增多，过小则壁部减薄。

③ 由图 7.3-4 核定 x_m 与 a 取值是否恰当，以保证起旋点仰角 $\theta_0=45\sim60°$。θ_0 过小易起皱，过大壁部易裂。

④ 反复修正 x_m 值，并进行核算，直到合适为止。

⑤ 求 y_m

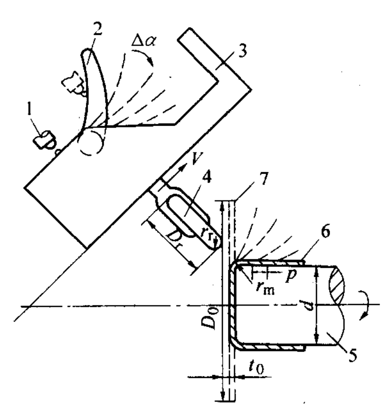


图 7.3-2

1—仿形器；2—活动模板；3—固定模板；4—旋轮；
5—旋压模；6—工件；7—坯料

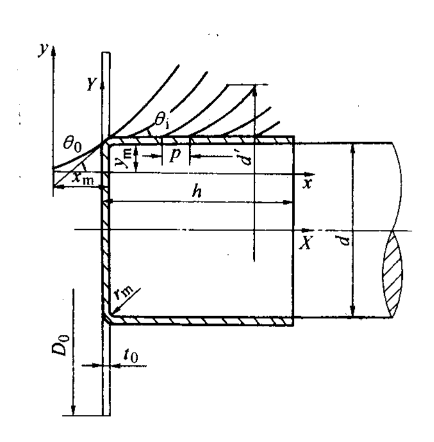


图 7.3-3　旋筒形件确定渐开线形运动轨迹简图

$$y_m = 0.085a - t_0 \tag{7.3-2}$$

使后期道次起旋点仰角 $\theta_i \approx 30°$。

⑥ 确定渐开线形状：由表 7.3-6 查得或由式（7.3-3）算出

$$\left.\begin{aligned} \phi &= 0.97\left(\frac{r}{a}\right)^{0.5138} \\ x &= r\cos\phi \\ y &= r\sin\phi \end{aligned}\right\} \tag{7.3-3}$$

式中，r 为半径，$0 \sim a$ 之间的适当间隔。

各道次旋轮运动的终点位置可由式（7.3-4）确定，（见图 7.3-3）。

$$d' = D_0\left\{1 - \left[1 - \left(\frac{d}{D_0}\right)^2\right]\frac{X^2}{h^2}\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{7.3-4}$$

铝、铜料在多道次旋压过程中如产生过大凸耳，宜及时切除。

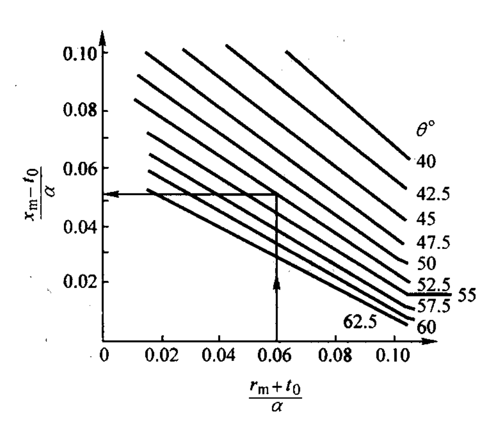


图 7.3-4　$(x_m - t_0)/a$ 与 $(r_m + t_0)/a$ 的关系

表 7.3-6　渐开线曲线坐标

r/a	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
x/a	0.048 9	0.095 6	0.140 0	0.182 2	0.222 2	0.259 9	0.295 4	0.328 8	0.359 9	0.388 9
y/a	0.010 3	0.029 2	0.053 6	0.082 3	0.114 5	0.149 7	0.187 5	0.227 7	0.270 0	0.314 1
r/a	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
x/a	0.415 8	0.440 6	0.463 2	0.483 8	0.502 4	0.518 9	0.533 4	0.546 0	0.556 6	0.565 3
y/a	0.359 9	0.407 2	0.455 9	0.505 8	0.556 8	0.608 8	0.661 7	0.715 4	0.769 8	0.824 8

3）进给比与转速。旋轮沿拖板移动的进给速度是多道次拉深旋压最主要的参数。提高进给比（主轴每转的旋轮进给量）可提高工效，但工件容易起皱。减小进给比有助于改善表面粗糙度，但过小易造成壁部减薄，不贴模。采用反推辊时应适当加大进给比以防坯料减薄过多。常用选择范围是 $f \approx 0.3 \sim 3$ mm/r。粗旋、软料取大值，复杂件及精旋时取小值。

在第一道次容易起皱，这时旋轮进给速度小些为宜。

提高转速使工效提高，但要避免机床振动。可在较大范围选择，参见表 7.3-7 及图 7.3-5。

表 7.3-7　铝板拉深旋压转速

坯料直径 D_0 /mm	<100	100～300		300～600		600～900	
坯料厚度 t_0/mm	0.5～1.3	0.5～1.0	1.0～2.0	1.0～2.0	2.0～4.5	1.0～2.0	2.0～4.5
转速 /r·min^{-1}	1 100～1 800	850～1 200	600～900	550～750	300～450	450～650	250～550

4）旋轮直径及圆角半径。选择旋轮直径需考虑旋压件的最大直径、板坯的材料及厚度，一般认为坯料直径大时可以选得大一些。

旋轮圆角半径与板坯材料及拉深旋压的方式有关。

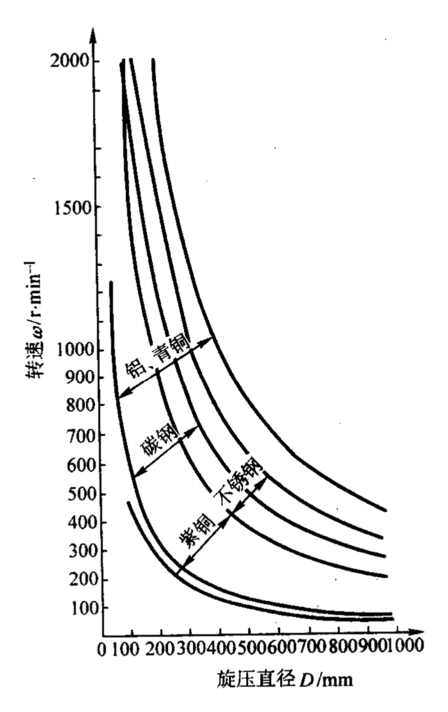


图 7.3-5 转速与旋压直径的关系

周向线速度 v/m·min^{-1}

铝、青铜 200 ~ 1 300 纯铜 150 ~ 600

碳钢 200 ~ 800 不锈钢 600 ~ 1 000

旋轮顶端圆角半径应使在旋轮前形成适量隆起以利于坯料流动。圆角半径过大易造成起皱、扩径，过小易造成堆积、断裂。旋铝料时圆角半径宜稍大，以免产生氧化粉末及剥离。常用选择范围参见表 7.3-8。

表 7.3-8 旋轮顶端圆角半径 r_r

工序	r_r/mm	备注
简单拉深旋压	$>5t_0$	
多道次拉深旋压、缩口	6 ~ 20	小件取小值

5）润滑与冷却。润滑剂的作用是防止坯料与工具摩擦或粘结，主要施于旋轮工作表面。

旋轮与板坯之间的接触摩擦使油性润滑膜容易被高温高压破坏，因此，应采用抗粘结添加剂。常用的抗粘结添加剂是含硫、磷、氯的化合物。润滑剂的选用参见表 7.3-9。

冷却剂的作用是带走旋压时产生的热量，保持工具、坯料温度平衡，在旋厚、硬料，尤其是批量生产时采用。常用

表 7.3-9 旋压润滑剂的选用

旋压条件		润滑剂种类
冷旋	铝、铜、软钢	机油、乳化液等
	同上，工件表面要求高	肥皂、凡士林、白腊、动植物脂等
	钢	二硫化钼油剂
	不锈钢	氯化石蜡油剂
热旋	< 300℃	二硫化钼
	> 300℃	胶体石墨
	> 600℃	玻璃润滑剂
	钛	可不加

的有机油、防锈水溶性油、乳化液等。乳化液冷却效果好，但易使铝合金表面发乌。

（2）局部成形——缩径、扩径

1）缩径。缩径旋压是指使用旋轮（或摩擦块）对回转体空心件或管状坯料进行径向局部旋转压缩，以减小其直径的成形方法。

为了避免工件产生起皱和破裂，应根据缩旋前后直径之比，将过程分成若干道次或工序进行，即旋轮要作多次往复运动，且每次之前均给以一定的进给量，有时还需要更换几次旋压模和进行中间热处理等。根据材料和工件尺寸，有时要在加热条件下缩旋。如有可能通过支承容器边缘以减少产生起皱的趋势，从而可增大进给并减少生产周期。

缩径时采用反程旋压（图 7.3-6）有利于克服往程旋压时坯料与旋压模在大端接触造成小端已成形部分反旋离模的现象。道次间距 p 常取 3 ~ 6 mm，用软料、厚料时取大值。对一些厚、硬料采用多轮成形可以提高合格率和成形精度。

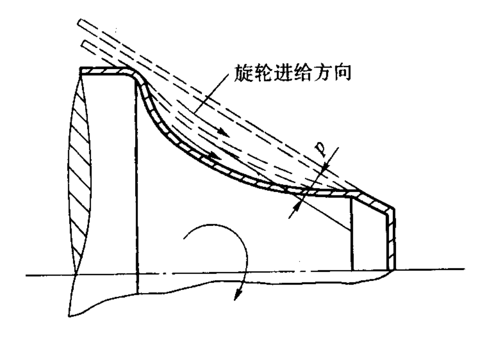


图 7.3-6 缩径——反程旋压

缩口时采用往程旋压易使坯料减薄，采用反程旋压则相反，二者的复合可减少壁厚差（图 7.3-7）。缩口时转速与进给量的选择参见表 7.3-10 和表 7.3-11。

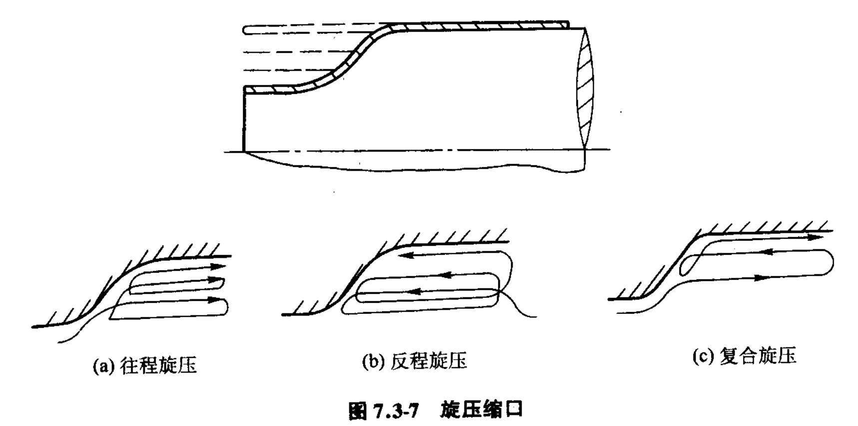


图 7.3-7 旋压缩口



表 7.3-10 缩旋时主轴转速的选择

工件直径/mm	转速/r·min⁻¹	工件直径/mm	转速/r·min⁻¹
50	3 000 ~ 3 500	250 ~ 300	1 200 ~ 1 400
50 ~ 100	2 000 ~ 3 000	300 ~ 400	800 ~ 1 000
100 ~ 150	1 800 ~ 2 000	400 ~ 500	600 ~ 800
150 ~ 200	1 500 ~ 1 800	500 ~ 700	300 ~ 600
200 ~ 250	1 300 ~ 1 600		

表 7.3-11 旋压缩口进给量的选择 mm/min

铝	铜	钢
1 000 ~ 1 200	1 200 ~ 1 400	800 ~ 1 000

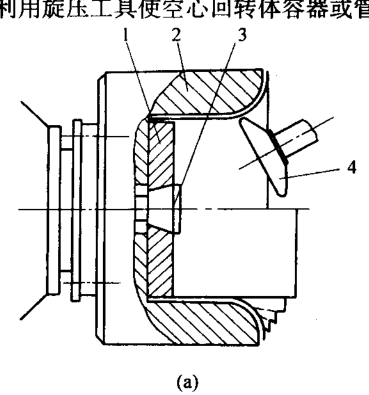
2）扩径。扩径是利用旋压工具使空心回转体容器或管状坯料进行局部（中部或端部）直径增大的旋压成形方法。扩径是用来制造各种鼓形件和口部翻边件的有效方法。例如鼓风机外壳、鼓形搅拌器的壳体、汽车、拖拉机车轮轮壳等。

扩径所使用的预成形坯可由拉旋、强旋法提供，也可用深拉深、卷焊和爆炸成形等方法提供。扩径本身也可为液压扩径机成形带有鼓肚、缺凹、卷边等的圆形、多边形和不对称的零件提供坯料。

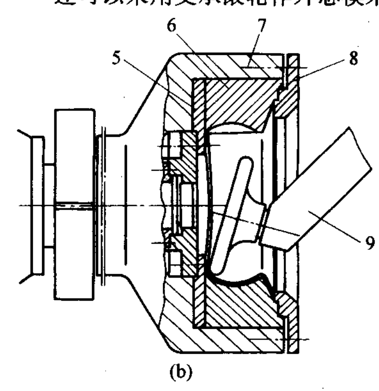
在制备用于扩径的焊接坯料时，必须严格地注意焊缝质量及焊接热影响区的组织性能。焊后坯料必须进行正火处理。

扩径成形时，可以采用外芯模扩径。外芯模扩径适用于回转体空心件、管形件和环状坯料（图 7.3-8）。

还可以采用支承滚轮作外芯模来成形。



(a)



(b)

图 7.3-8 外芯模扩径旋压

1—支承板；2—外芯模；3—锁紧锥头；4—旋轮；5—推料板；6—组合芯模；7—卡盘；8—卡爪；9—旋轮头

旋轮的进给量主要取决于材料的性能。一般说来，许多抗拉强度高的材料，扩旋要比缩旋更容易些，因扩旋时材料是受拉而不受压，因此每道次的进给量与扩径量可取大些。另外，在一般情况下，被扩径那部分的工件壁厚自然会引起一些变薄。但如果旋轮进给量选择适宜，则此壁厚可基本上保持不变。就这点而言，旋压扩径要比压力机上扩径优越。

(3) 制梗

制梗是普通旋压中的辅助成形方法，包括翻边、卷边、搭边、压筋等。为了使制件边缘平整光滑或提高其结构刚度，往往需要进行卷边，卷边时可按坯料厚度选择圆梗直径。根据经验，径向卷边的幅度与工件壁厚的关系可按表 7.3-12 选择。卷边过大（直径过小）会产生表面粗糙或剥离。

卷边前最好在法兰上切出斜切口（图 7.3-9）。

端口外卷边时（图 7.3-10a）宜先预弯，再卷边；内卷边时则可直接进行（图 7.3-10b）。

表 7.3-12 圆梗直径的取值 mm

坯料厚度	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
圆梗直径	1.5 ~ 2.5	2.5 ~ 3.5	4 ~ 8	5 ~ 14	8 ~ 18	14 ~ 22	18 ~ 24	20 ~ 30

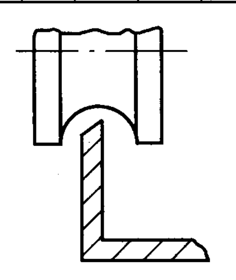
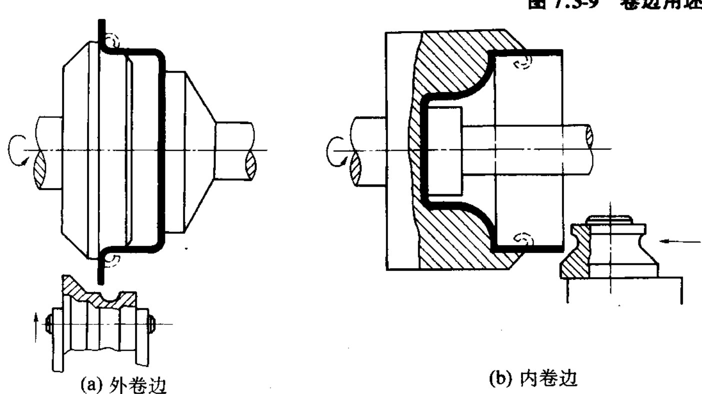


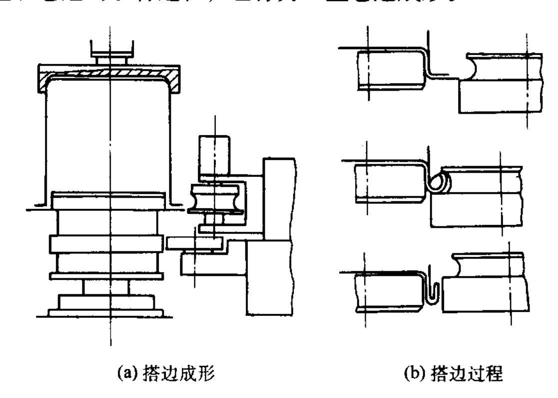
图 7.3-9 卷边用坯料边缘的斜切口



(a) 外卷边　　(b) 内卷边

图 7.3-10 端口卷边简图

搭边成形是为了使两个回转体件的边缘弯曲变形而紧密地搭接在一起，如图 7.3-11 所示。首先把所要搭接的两个工件边缘对齐，然后用成形滚轮的圆弧部分使它们一起卷曲，最后再用滚轮的圆柱段使之压扁而结合成一体。它是翻边和卷边的联合过程，也称为二重卷边成形。



(a) 搭边成形　(b) 搭边过程

图 7.3-11　搭边成形

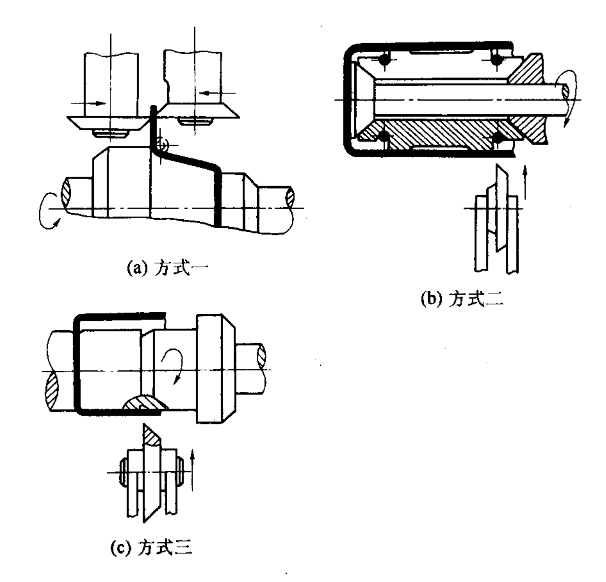
(4) 剪切加工

在进行普通旋压时，往往需要工件的边缘平齐，为此要进行剪切修整加工。

图 7.3-12 所示是用旋轮进行切割的三种方式。偏心法的优点是卸除料边方便。切割轮应楔入板厚 10%左右。切铝料用切割轮或切刀均可；切钢材，在圆周速度大于 150 m/min时宜用切割轮而不宜用切刀。

进行分劈（图 7.3-13）时，采用带锐角的旋轮，刃口与板厚中心的偏差应不大于 0.02 mm。分劈后再以成形旋轮校形。

对成形完毕的有色金属件可在旋压模上用尖头擀棒将工件外层在旋转中刮去 0.05～0.1 mm 以获得优质表面。



(a) 方式一　(b) 方式二　(c) 方式三

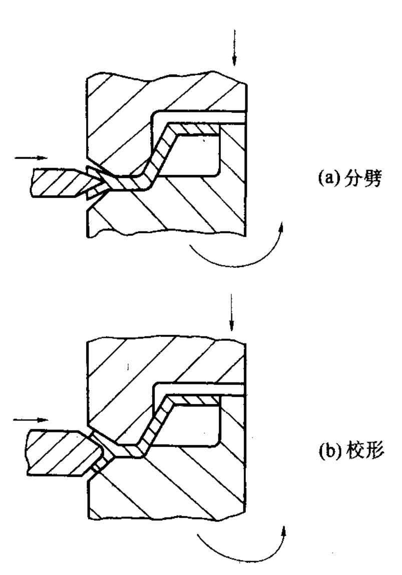
图 7.3-12　用旋轮切割的三种方式

1.3　普通旋压工装设计

(1) 擀棒和旋轮

普通旋压可分为手工旋压和机动旋压两种。手工旋压通常采用的变形工具有擀棒和旋轮。

1) 擀棒。擀棒一般由木柄和钢质成形头组成，擀棒工作接触面小、力臂长、省力。擀棒的典型外形与用途见表 7.3-13。



(a) 分劈

(b) 校形

图 7.3-13　劈开式皮带轮旋制过程

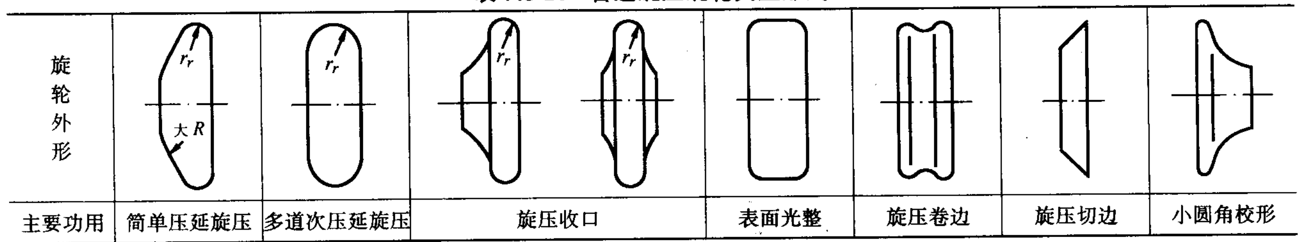
表 7.3-13　擀棒头部典型形式及用途

No.	工作头名称	简图	用途
1	钝头		压延旋压用
2	舌形		旋复杂形状用
3	鱼尾形		旋压扩口用
4	弯头形		旋压扩径用
5	球形		精整用
6	尖头形		切边、刮削用
7	特形		型面成形用
8	槽形		卷边用

2) 旋轮。手工旋压用的各种旋轮就是把旋压时滑动摩擦的成形头改为旋轮的形式。为了进一步减少摩擦力，最好在旋轮与其转轴之间装有滚动轴承。

机动普通旋压的旋轮原则上与手工旋压用的旋轮没有什么区别，只是在工作时承受更大的旋压力，因此，结构上更复杂。表 7.3-14 列举了普通旋压时旋轮的典型形式。

表 7.3-14　普通旋压旋轮典型形式



旋轮外形							
主要功用	简单压延旋压	多道次压延旋压	旋压收口	表面光整	旋压卷边	旋压切边	小圆角校形

旋轮是旋压加工的主要工具之一，也是使旋压工艺取得良好效果的一个重要影响因素。工作时，它与坯料直接接触，承受着巨大的接触压力、旋轮工作部分的表面情况（形状尺寸、精度、硬度和表面粗糙度等）直接影响工件的质量。因此，旋轮应具有足够的强度、刚度、硬度和耐热性、合理的结构形状和尺寸精度以及良好的工作表面。

一般情况，旋轮必须选用优质的工具钢或含钒的高速钢制造，并淬火到极高的硬度和抛光成镜面状态。但是，采用表面硬化的材料是不适宜的。

室温旋压时，旋轮工作部分材料的选用可参照表 7.3-15。加热旋压时，可参照表 7.3-16。

表 7.3-15　普通旋压旋轮用料示例

旋压工具用料	用途	功能
工具钢、高速钢（淬火、抛光）	通用	抗压、耐磨
青铜、磷青铜	钢、不锈钢旋压	减少表面摩擦
硬木、尼龙、竹	软料旋压	减少表面硬化
夹布胶木	铝料精整校形	

表 7.3-16　加热旋压旋轮用料示例

旋压工具用料	使用范围
45 钢	软料、小批量、小于 300℃
高速钢	＜400℃
热作工具钢 3Cr2W8、5CrNiMo 等	＜500℃
耐热合金及不锈钢	＜800℃

旋轮外径常用范围是 50～250 mm，手工旋压、小件取小值。

(2) 旋压模

旋压模是旋压过程中不可缺少的主要变形工具。在旋压过程中，金属材料变形时沿旋压模接触面流动而产生很大的摩擦。因此，旋压模应具有足够的强度、刚度、硬度、精度和良好的耐磨性；同时，其表面应具有良好的表面粗糙度，不得有裂纹、划痕、擦伤和局部凸凹等缺陷。有时还要求热敏感性要低和线膨胀系数要小等。否则，将不同程度地影响工件的精度和表面质量。

旋压模分为外旋压模和内旋压模。前者指工件在模具外，后者指工件在模具内。按结构组成的不同，旋压模可分类如表 7.3-17 和 7.3-18。

表 7.3-17　旋压模类别

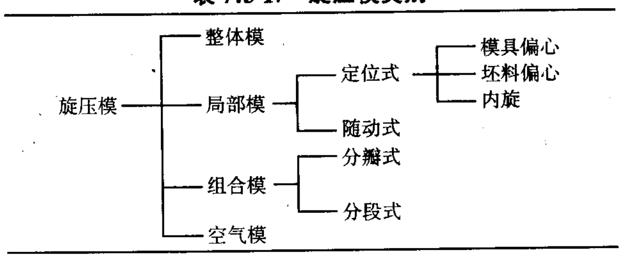


表 7.3-18　旋压模典型结构

名称	形式	主要用途
整体模		直径不变或单向增大的工件
分瓣模		工件母线中部带凹凸，工件直径不大于 250～350 mm，模具重量不大于 50 kg
分段模		工件母线中部带凹陷
局部模（位置一定）		局部成形
局部模（随动式）		整体成形
空气模		过渡工序及对外形要求不高时，$\frac{d}{t}>16$ 宜用双轮，$\frac{d}{t}<16$ 可用单轮

旋压模一般包括工作部分、与机床配合部分以及供坯料定位、压紧部分等。

组合模制造费工，装拆不便，但旋压精度优于局部模。分瓣组合模用于母线中部凸凹的轻型件（一般直径不大于 250～350 mm，重量不大于 50 kg）。分段组合模用于母线中部凹陷的工件以及供大件脱卸吊装用的特殊场合（图 7.3-14）。

随动局部模用于封头等大件的整体或局部成形。其他局部模及空气模一般用于对尺寸精度无严格要求的局部成形。

旋压模的型面尺寸可按工件相应尺寸的中、下差确定，经试旋后按回弹量再加以修正。



旋压模应有足够的刚度和良好的动平衡性能。大型模具亦可采用拼焊。

旋压模型面部分用料参见表 7.3-19。

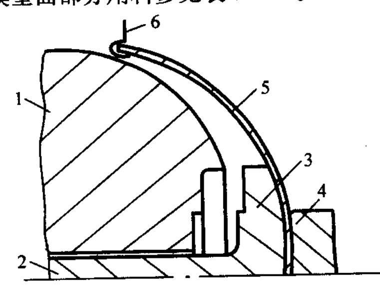


图 7.3-14 大型旋压件卸料

1—旋压模后段；2—顶杆；3—旋压模前段；4—尾顶；5—工件；6—吊具

表 7.3-19 旋压模用料示例

材料	特点	用途
硬木		普通旋压（软料、小批量）
工程塑料	回弹较大	
夹布胶木	价格高	
铸铝	质量轻、但寿命短	
铸铁（优质、球墨）	要求表面无砂眼	普通旋压，变薄旋压（软料）
结构钢（45 等）	30 ~ 35HRC	
渗氮钢（18CrNiW 等）	50 ~ 55 HRC，深 0.3 mm	
冷作工具钢、轴承钢、轧辊钢	55 ~ 58HRC	通用

制造旋压模的材料，要根据所成形工件的批量、坯料的性质以及成形的方式等确定。普通旋压用的旋压模材料已有多种，如：软木、硬木、锌、铝、铸铁和钢等。软木仅用于一次性旋压时，而且旋压软质的坯料。因为软木不但质软，而且易变干，尺寸会发生变化。硬木旋压模较前者好些，有时也可用于小批量生产中。木质旋压模常常采用若干木块胶粘和用螺钉联接后车削而成，有时用钢圈加强。锌、铝（硬铝）和铸铁旋压模都应是铸造的，并经车削和抛光。钢制旋压模适用于较大批量和硬质材料的生产。

（3）尾顶

尾顶装置用于夹紧坯料防止其与旋压模相对转动。除了顶紧坯料外，有时还要参与某些成形工作。尾顶装置结构有多种形式，主要取决于工件的形状与结构。对于中小尺寸工件，多采用尾顶块、尾顶尖、尾顶杆或者它们的组合形式。大尺寸工件的尾顶装置多采用尾顶盘形式；可以是整体式，也可以是组合式。尾顶块工作部分应与坯料有尽可能大的接触面积，但须避免与旋轮干涉。当工件端部较小时可先用小尾顶，在成形一部分后再换大尾顶。尾顶选材一般无需用淬火料。

（4）反推器

反推器主要作用是防止坯料起皱。一般在拉深旋压的前期道次中采用。在手工旋压时可采用实心棒或块，与旋压擀棒相对应，施于坯料另一侧。在半自动旋压机上可采用反推辊（图 7.3-15）。旋铝或铜料时宜用橡胶或工程塑料辊，在对工件表面有高要求时则不宜采用。

1.4 旋压力的计算

（1）模拟试验法求解

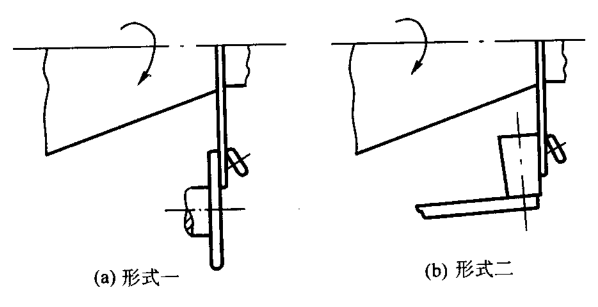


图 7.3-15 反推辊

旋压力指坯料对旋压头的作用力。根据相似准则推导旋压力的步骤如下。

1）令模拟件与工件的相应角度相等，令模拟件的尺寸、进给比与工件相应尺寸、进给比保持一定比例关系，如表 7.3-20 所示。

表 7.3-20 模拟试验参数

项目	角度	尺寸	进给比	坯料性能
工件	α	l	f	σ_s
模拟件	$\alpha'=\alpha$	$l'=\frac{1}{m_r}l$	$f'=\frac{1}{m_r}f$	$\sigma_s'=\frac{1}{m_c}\sigma_s$

注：m_r 为几何相似系数；m_c 为力学相似系数。

2）第一种情况：取模拟件旋压转速 ω' 与工件旋压转速 ω 相等，则

$$m_r=\frac{v}{v'}=\frac{T}{T'} \tag{7.3-5}$$

式中，v，v' 为进给速度；T，T' 为旋压时间。

第二种情况：取 $v=v'$，$T=T'$，则

$$m_r=\frac{\omega'}{\omega} \tag{7.3-6}$$

一般取 $m_c=1$。

3）由模拟试验测出旋压力 F'，就可推算出工件旋压时的力

$$F=F'm_c m_r^2 \tag{7.3-7}$$

[例]：已知工件坯料厚度 $t_0=5.2$ mm，坯料直径 $D_0=260$ mm，旋压转速 $\omega=100$ r/min，进给速度 $v=24$ mm/min。通过模拟试验求旋压力。

取几何相似系数 $m_r=4$。求得模拟件坯料厚度 $t_0'=5.2/4=1.3$ mm，坯料直径 $D'_0=260/4=65$ mm。取转速 $\omega'=\omega=100$ r/min，则进给速度 $v'=24/4=6$ mm/min。

由给定的材料机械性能数据求得 $m_c=\sigma_s/\sigma_s'=0.82$，则 $m_c m_r^2=0.82\times4^2=13.1$。

由模拟件旋压测力得径向力 $F_r'=2\,850$ N，轴向力 $F_z'=2\,750$ N。

按相似准则可推算出工件旋压时的径向力 $F_r=2\,850\times13.1$ N $=37\,335$ N，轴向力 $F_z=2\,750\times13.1$ N $=36\,025$ N。

旋压力加上油缸、导轨等部分的摩擦力为机床作用力。通常，某方向的机床作用力与相应旋压分力之比为 1.1 ~ 1.4。

粗略估算，旋 1 mm 不锈钢需机床作用力 10 kN，旋 1 mm 硬铝需机床作用力 3.5 kN。

（2）屈服线计算法求解

由图 7.3-16 变形模型的静态分析，得

$$P=\frac{1}{4}\sigma_s t_0^2\left(\frac{r}{r_0}-k\right)^{-1}[1\pm(1-2k)^2]\sqrt{1+\frac{1}{k}} \tag{7.3-8}$$



式中，σ_s 为屈服点；k 为 r_1/r_0。

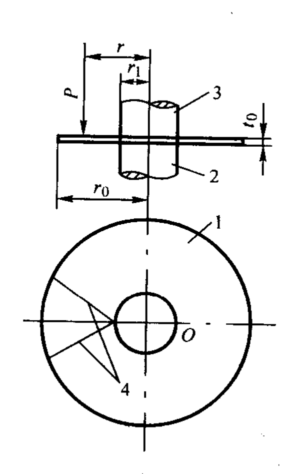


图 7.3-16　变形模型
1—坯料；2—旋压模；3—尾顶；4—屈服线

1.5　特殊旋压方式

(1) 加热旋压

加热旋压主要用于钨、钼、钛等难熔金属的旋压，或者当材料常温塑性差，零件外形复杂或机床能力不足时采用。另外几乎所有变形量大的收口都要加热，以减少废品，提高工效。

加热旋压时的成形精度不如冷旋。

加热源可因地制宜选用氧－乙炔气、氢气、天然石油气、煤气及中频、工频感应装置等。

加热温度的选择范围参见表 7.3-21，应按供料的成分、状态、加工方式及旋压条件等具体确定。

加热旋压时，工模具材料及润滑剂的选用参见表 7.3-22。加热旋压大件及小批量旋压时，模具材料可采用一般铸铁。加热旋压钛及其合金时，表面生成的氧化膜可代替润滑剂。为避免在加热过程中坯料吸收氢气等有害物质，加热温度应避免过高，加热时间应尽量短。

加热旋压应注意如下事项：

1) 旋压模应预热，温度为旋压温度的 1/3～1/2。

2) 旋压模、坯料和旋轮都应有充分的润滑。

表 7.3-21　加热旋压时温度的选择范围　℃

材料	工业纯钛	TC－4	镁及镁合金	钼及钼合金	钨及钨合金	钽及钽合金	铌及铌合金	锆	镍铬不锈钢
加热温度/℃	426～536	535～870	320～350	400～1 065	600～1 316	409～649（无保护时最高到480）	20～750（无保护时最高到425）	850	600～750

表 7.3-22　加热旋压用工模具材料及润滑剂选用示例

工件温度/℃	材料	润滑剂
＜200～300	高速钢，硬质合金	二硫化钼油剂
＜400～500	热作模具钢 5CrNiMo 等	二硫化钼油剂，胶体石墨
＜500～600	热作工具钢 3Cr2W8 等	胶体石墨
＜800～1 000	耐热合金 GH130 等	胶体石墨，玻璃润滑剂

3) 旋压模和旋轮轴承可靠地冷却，以保持热平衡和防止退火软化。

4) 对特种铸造、粉末压制坯和钨、钼等晶粒粗大易分层的坯料，首次旋压温度应尽量高，以后逐次降低。

5) 特别注意温度因素对坯料、模具设计及靠模板修正、安装等的影响。

(2) 卧式盘多轮旋压

卧式盘多轮旋压的工作方式见图 7.3-17，在卧式转盘 4 上装有多个小旋轮 5，转盘边讲给边自转，使小轮依次进入工作区。在同一瞬间可有几个小轮同时工作。

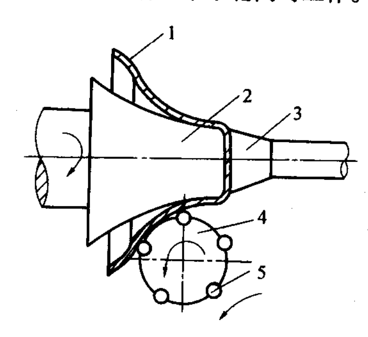


图 7.3-17　卧式盘多轮旋压简图
1—坯料；2—旋压模；3—尾顶；4—卧式转盘；5—小旋轮

此法优点是旋轮与坯料接触弧长，利于消除折皱。在一道次中，拉深旋压系数可达 3.5，二道次可达 5，适于大批量生产。此法生产效率高，宜于铝、铜等薄壁件（扬声器等）的大批生产。缺点是坯料与旋轮的回转方向相垂直，摩擦剧烈，噪声大，工件表面需经光整校平，工件局部变薄大，可达 50%。

转盘转速可取主轴转速的 1/100 左右。转盘直径可取锥形工件大小端直径差的 1/3 左右。小旋轮直径高度比约为 2～3，过大则易产生起皱、底部拉断，过小则厚薄不均，壁部破裂。

(3) 立式盘多辊旋压

立式盘多辊旋压工作方式见图 7.3-18，在立式转盘 4 上装有依次工作的几条型面逐渐增高的轧辊，在转盘一转中可完成全部成形工作。宜于大批量生产。此法工效高，但轧辊设计、制造、调试有一定难度。

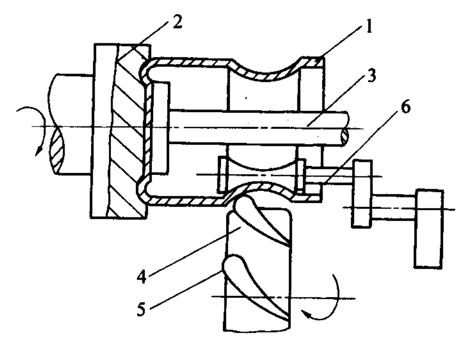


图 7.3-18　立式盘多辊旋压简图
1—坯料；2—底模；3—尾顶；4—立式转盘；5—轧辊；6—局部旋压模

(4) 摩擦工具旋压法

摩擦工具旋压法（也称切向滚压法）是借助一块具有一



定型面的摩擦块或滚轮对管坯端部进行旋转压缩成形，最终实现管端的缩口或封口。是属于普通旋压中缩径旋压范畴的一种旋压成形方法。

本法的优点是所需工模具简单，适用于气瓶等厚壁件的批量生产。

摩擦工具旋压法的成形过程如图 7.3-19 所示。以用摩擦块进行气瓶封底旋压为例，首先将管坯 1 的端部用加热器加热到锻造温度，并使之回转，此时用摩擦工具块 2 作沿管坯 1 的轴向成垂直或某夹角方向移动，逐渐地把管端缩径、封闭成形。这种旋压不用旋压模，因此又属于无旋压模旋压或"空气模"旋压法。

当管坯直径与厚度之比 $\frac{d}{t}>16$ 时宜用双轮，$\frac{d}{t}<16$ 时可用单轮。

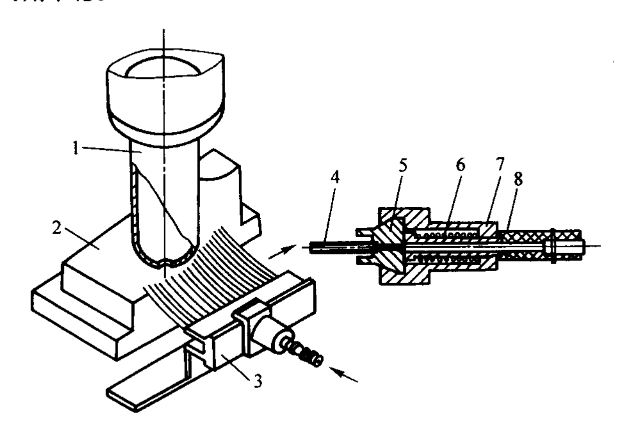


图 7.3-19 摩擦工具旋压法

1—管坯；2—带有型面的摩擦工具块；3—加热器夹具；4—火焰管；5—集气块；6—弹簧；7—分配器；8—压缩空气和氧气管道

(5) 分层错距简单拉深旋压

如图 7.3-20 所示，本过程可将二道次拉深旋压合为一道次进行，使工效提高。此外，它还能减少工件扩径量，改善其尺寸精度。图 7.3-20 所示杯形件经多道次手工普通旋压后，工件比旋压模大 3.2 ~ 5.6 mm，采用二道次拉深旋压时大 6 mm，而采用本方法后则减为 1.9 ~ 2.4 mm。

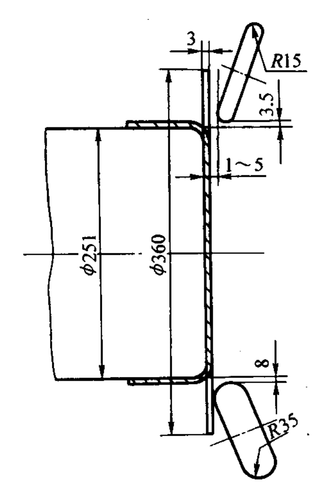


图 7.3-20 分层错距简单拉深旋压图例

(6) 无靠模旋压法

日用搪瓷制品的坯体在成形时，一般采用靠模旋压成形法。该法虽有成形准确、可靠的特点，但同时又存在成形变化自由度小的弱点。

无靠模旋压法就是对传统的靠模旋压工艺进行改进，而派生出来的一种新的旋压成形方法。其工作原理如图 7.3-21 所示。

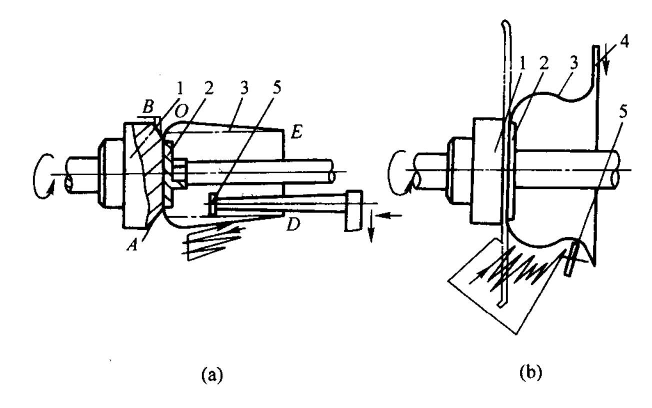


图 7.3-21 无靠模旋压法示例

1—托底盘；2—压紧盘；3—坯料；4—剪切轮；5—滚轮

先将坯料或板料放置托底盘上，然后用压紧盘夹紧，主轴带动坯件或板料旋转，然后，手工操动旋轮在无靠模的情况下进行循环往复移动，进行旋压成形，直至将坯料旋压成目标形状。

无靠模旋压法，可以迅速加工出形状繁多，尺寸各异的产品，市场反映速度快。与冲压工序组合，可以对较厚的板料进行成形。尤其适合压力设备不足的企业或小型企业应用。适于多品种、小批量、短周期的生产，投资少、见效快。

采用无靠模成形法应重点解决 *O* 点附近材料的严重变薄现象。见图 7.3-21a，入滚轮时应从 *O* 点以左 10 ~ 20 mm 部位开始，增加往复次数。这时，应该由里向外拉为主，以减轻 *O* 点附近材料变薄现象。众所周知，工件一旦有皱就不易消除。只要正确掌握对成形影响最大的工艺条件，就可在最后一道旋压成形中完全消除皱褶，得到满意的工件。

在无靠模旋压成形时，要尽量做到入旋轮时要轻，逐渐加力，收尾时要逐渐减力。

1) 还应注意冲压预制件角部的圆角半径，如果太小，则旋压时工件上易留有角部的痕迹。

2) 旋压工件前可先进行外缘弯边，以提高刚性，防止起皱。

3) 在多次旋压时，为保证工件口部质量，可以在首次行程中使旋轮行进到外缘前就返回，即外缘不旋压。也可以两次或三次中有一次不旋压到外缘。

2 变薄旋压

2.1 变薄旋压的应用

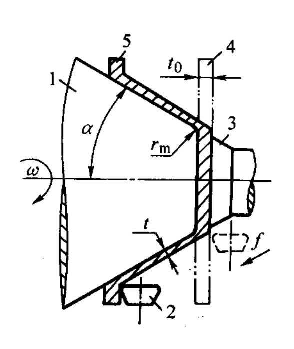
(1) 变薄旋压的成形过程及其分类

变薄旋压又称强力旋压，是在普通旋压的基础上发展起来的。它的运动方式与普通旋压相同，差别在于变薄旋压中坯料壁厚在成形中显著减薄，而直径尺寸则基本不变。它的典型过程是：尾顶块将坯料夹紧，旋压模旋转，旋轮作进给运动使坯料连续逐点变薄，并贴靠旋压模而成为所要求的工件。典型的变薄旋压过程如图 7.3-22 所示。

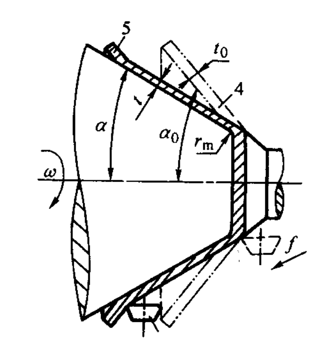
锥形变薄旋压又称剪切旋压。剪切旋压时，板坯或预制坯沿轴向逐层产生错移而轴向厚度基本不变，它适于锥形、抛物线形、椭球形及各种扩张形件的成形。筒形变薄旋压又称流动旋压。正旋压时变形坯料的流向与旋轮进给方向相同，反旋压时则相反。

(2) 变薄旋压的特点

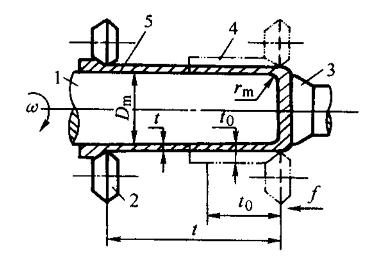




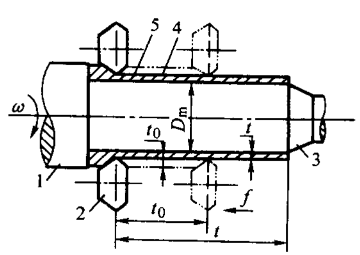
(a) 锥形变薄旋压——反旋压



(b) 锥形变薄旋压——正旋压



(c) 筒形变薄旋压——正旋压



(d) 筒形变薄旋压——反旋压

图 7.3-22 典型变薄旋压过程

1—旋压模；2—旋轮；3—尾顶；4—坯料；5—工件

剪切旋压和筒形变薄旋压可以获得高于普通旋压的尺寸精度，并可提高制件的强度，能进行长而薄的整体空心件及一些难加工材料的成形。可以取代传统工艺并可获得较好的技术经济效益。

变薄旋压过程遵循体积不变条件。对于锥形变薄旋压，坯料可为板料或预制件，其壁厚及预制半锥角可由正弦律计算。在平板旋压时

$$t = t_0 \sin\alpha \tag{7.3-9}$$

在预制坯旋压（图 7.3-22b）时

$$\frac{t}{\sin\alpha} = \frac{t_0}{\sin\alpha_0} \tag{7.3-10}$$

在筒形变薄旋压时

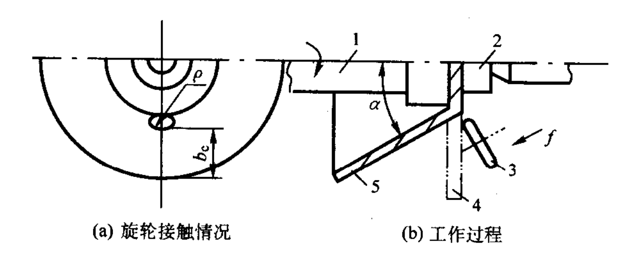
$$\left(D_m + \frac{t_0}{2}\right) t_0 l_0 = \left(D_m + \frac{t}{2}\right) tl \tag{7.3-11}$$

或简化为

$$t_0 l_0 \approx tl \tag{7.3-12}$$

在锥形件无模旋压过程（图 7.3-23）中可以看到普通旋压和变薄旋压的关系。当 $\frac{b_c}{\rho} < 1.48$ 时为普通旋压；当 $\frac{b_c}{\rho} > 1.48$ 即呈现为锥形变薄旋压，壁厚变化符合正弦律。

在典型的变薄旋压过程中法兰应变小，变形区处于二向受压（正旋）和三向受压（反旋）的有利状态。因此可旋压的材料不但包括所有可锻造的材料，还包括一些通常难成形的材料，如难熔金属等。坯料制造可以采用压力加工、特种铸造、电渣熔炼、粉末压制及焊接等方式。坯料状态可为退火，调质，正火等。



(a) 旋轮接触情况　　(b) 工作过程

图 7.3-23 锥形件无模旋压简图

1—芯杆；2—尾顶；3—旋轮；4—坯料；5—工件

变薄旋压件可具有小的壁厚差（0.000 5 ~ 0.05 mm）和优于普通旋压及拉深的直径精度。表 7.3-23 所示是用高精度三旋轮旋压机所获筒形变薄旋压件的精度。经验数据表明工件直径每增大 10 mm，直径误差约增大 0.01 mm。

表 7.3-23 筒形变薄旋压件精度

mm

内径	≤150			>150 ≤250			>250 ≤400			>400 ≤600		
壁厚	<1	1~2	>2	<1	1~2	>2	<1	1~2	>2	<1	1~2	>2
内径公差（±）	0.10	0.10	0.15	0.10	0.15	0.15	0.20	0.25	0.25	0.25	0.30	0.35
椭圆度（≤）	0.05	0.05	0.10	0.10	0.12	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.50
弯曲度/m（≤）	0.20	0.15	0.15	0.35	0.25	0.25	0.45	0.45	0.45	0.45	0.50	0.50
壁厚差/批（±）	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05
壁厚差/件（±）	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03	0.04

变薄旋压件的微观表面粗糙度可达到较高级别：与旋压模相接触的表面可与模具表面达到同一级别，与旋轮相接触的表面则如图 7.3-24。旋压表面的宏观波度取决于系统刚度和工艺条件，可以有较大差别。



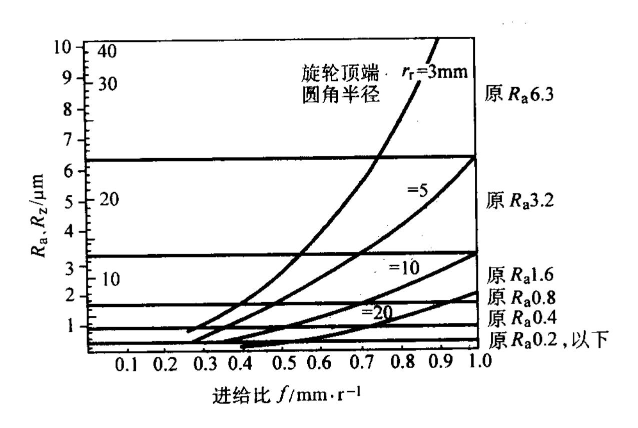


图 7.3-24 表面粗糙度与 f、r_r 的关系

变薄旋压可以细化晶粒，提高强度和抗疲劳性能，从而有助于产品性能的提高，延寿和减重。变薄旋压工件的表面残余应力通常呈压应力，制件适于长期存放。坯料中的夹渣、分层等缺陷会在旋压过程中自行暴露。

采用变薄旋压形变热处理工艺可以进一步改善材料的综合性能，并减少旋后热处理变形。例如采用“调质－变薄旋压－回火”（一般钢及合金钢），“固溶处理－变薄旋压－时效”（马氏体钢）等。

(3) 变薄旋压的工艺要素及其影响

变薄旋压时，坯料、工艺及工艺装备诸方面的主要影响因素列于表 7.3-24。其选择及搭配，应使加工过程中不产生旋轮前隆起（堆积）、不破裂、不严重扩径，并保证质量好、效益高。

2.2 变薄旋压的工艺参数

(1) 锥形变薄旋压（又称剪切旋压）

1) 坯料。在锥形变薄旋压时，板坯厚度尺寸可按表 7.3-25 进行计算，其中简图 a、b 分别按公式计算壁厚与锥角。其余均将坯料与工件沿径向等分，一一对应进行计算。一般以工件及坯料内径为准，分段数量要足够。先依次计算各段的平均锥角及壁厚，然后叠加。

表 7.3-24 变薄旋压工艺要素及影响

项目	成形要素																
	坯料方面					工艺装备方面							工艺方面				
	热处理状态	壁厚	壁厚差	预制坯直径	预制坯径跳	旋压模径跳	旋压模表面粗糙度	旋轮直径	旋轮顶端圆角半径及型面	旋轮径跳	旋轮表面粗糙度	旋轮数量	正、反旋压	每道次减薄率	偏离率	进给比	主轴转速
隆起（堆积）	○	○							○					○	△	○	
破裂	■	■							■					■		○	
直径精度	■		■	■	■	■			■	■		■	■	○	△	○	
贴模度，不直度	■	■	■	■	■	■		○	■	■		■	■	■	△	■	○
壁厚精度			■		■	■				■					△		
内表面粗糙度							■							○	△		
外表面粗糙度									■		■		■		△	■	
表面波度						■				■						■	■
施压力	■	■										■	■	■	△	■	
工效													■	■		■	■

注：△—锥形变薄旋压 ○—筒形变薄旋压 ■—变薄旋压

表 7.3-25 锥形变薄旋压坯料的尺寸计算

坯料	工件	简图	计算公式
等厚板坯	等厚工件	t, α, t_0 (a)	$t = t_0\sin\alpha$

续表 7.3-25

坯料	工件	简图	计算公式
等厚板坯	不等厚工件	t_n·α_n, t_2·α_2, t_1·α_1, t_0 (b)	可分段按下式计算 $t_1 = t_0\sin\alpha_1$ $t_2 = t_0\sin\alpha_2$ ………… $t_n = t_0\sin\alpha_n$
不等厚板坯	等厚工件	α_n, t, α_2, α_1, t_{0n}, t_{02}, t_{01} (c)	可分段按下式计算 $t = t_{01}\sin\alpha_1$ $t = t_{02}\sin\alpha_2$ ………… $t = t_{0n}\sin\alpha_n$



续表 7.3-25

坯料	工件	简图	计算公式
等厚预制坯	等厚工件	t, t_0, α, α_0 (d)	$\frac{t}{\sin\alpha}=\frac{t_0}{\sin\alpha_0}$
等厚预制坯	等厚工件	t_{0n},α_{0n}; t_n,α_n; n; t_{01},α_{01}; t_1,α_2 (e)	可分段按下式计算 $\frac{t_1}{\sin\alpha_1}=\frac{t_0}{\sin\alpha_{01}}$ $\frac{t_2}{\sin\alpha_2}=\frac{t_0}{\sin\alpha_{02}}$ …………… $\frac{t_n}{\sin\alpha_n}=\frac{t_0}{\sin\alpha_{0n}}$

板坯外径（图 7.3-25a）可按下式计算：

$$D_0 \geqslant D + 6(1+\sin\alpha) + 2(r_r + t)\cos\alpha \qquad (7.3\text{-}13)$$

预制坯外径（图 7.3-25b）可按下式计算：

$$D_0 \geqslant D + 6(\sin\alpha + \sin\alpha_0) + 2(r_r + t)(\cos\alpha - \cos\alpha_0) \qquad (7.3\text{-}14)$$

带厚法兰工件的坯料应带预制段（图 7.3-26），预制段长度为

$$l \geqslant (1-\sin\alpha) r_r + (3\sim5) \qquad (7.3\text{-}15)$$

厚法兰每侧留加工余量 3 ~ 8 mm。

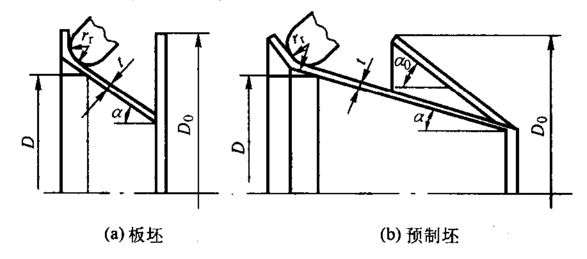


图 7.3-25　锥形变薄旋压坯料的直径留量

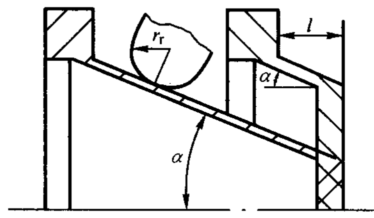


图 7.3-26　带厚法兰锥件的旋压坯料

2）减薄率与道次数。锥形变薄旋压的一道次减薄率应小于材料的极限减薄率，否则需进行中间退火或多道次旋压。锥形变薄旋压的减薄率为

$$\psi_t = \frac{t_0 - t}{t_0} \qquad (7.3\text{-}16)$$

在板坯旋压时　$\psi_t = 1 - \sin\alpha$　(7.3-17)

在预制坯旋压时　$\psi_t = 1 - \frac{\sin\alpha}{\sin\alpha_0}$　(7.3-18)

不同材料一道次旋压的极限减薄率 ψ_{tmax} 见图 7.3-27 和表 7.3-26。ψ_{tmax} 取决于材料的断面收缩率 ψ（图 7.3-28）

曲线 1　$\psi_{tmax} = \frac{\psi}{0.17+\psi}$　(7.3-19)

曲线 2　$\psi_{tmax} = \frac{\psi}{0.24+1.05\psi}$　(7.3-20)

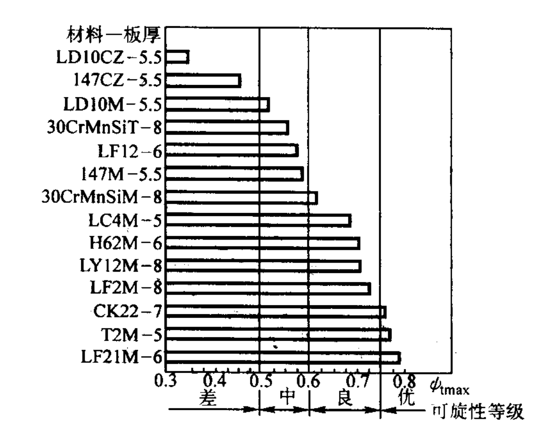


图 7.3-27　板坯椭球试验一道次 ψ_{tmax}

表 7.3-26　极限减薄率 ψ_{tmax}

材料	牌号	锥形件	球形件	筒形件
铝合金	2014	0.50	0.40	0.70
	2024	0.50	—	0.70
	5256	0.50	0.35	0.75
	5086	0.65	0.50	0.60
	6061	0.75	0.50	0.75
	7075	0.65	0.50	0.75
钢	4 130	0.75	0.50	0.75
	6 434	0.70	0.50	0.75
	4 340	0.65	0.50	0.75
	D6AC	0.70	0.50	0.75
	Rene41	0.40	0.35	0.60
	A286	0.70	0.55	0.70
	Waspaloy	0.40	0.35	0.60
	18%Ni	0.65	0.50	0.75
	321	0.75	0.50	0.75
	17-7PH	0.65	0.45	0.65
	347	0.75	0.50	0.75
	410	0.60	0.50	0.65
	H11 工具钢	0.50	0.35	0.60

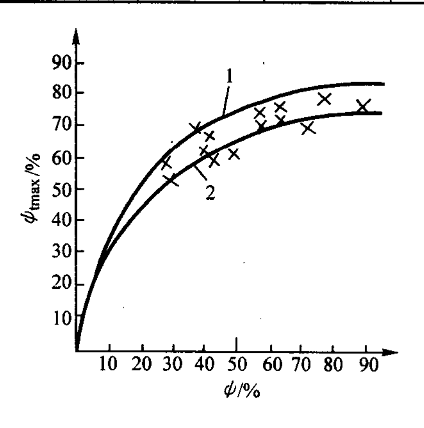


图 7.3-28　$\psi_{tmax} - \psi$
（×-试验点）



对厚板坯，ψ_{tmax}需乘以厚度系数 K_t，表 7.3-27 的 K_t 值主要由 LY12M 厚板得出。

表 7.3-27 K_t 值

板坯厚 t_0 /mm	<10	10~15	15~25	25~35
K_t	1.0~0.9	0.9~0.8	0.8~0.7	0.7~0.6

采用等减薄率进行多道次旋压时

$$\psi_{t1} = \psi_{t2} = \cdots = \psi_{tn} = (\Psi_t)^{\frac{1}{n}} \tag{7.3-21}$$

小锥角零件锥形变薄旋压，后期道次的变形规律接近筒形变薄旋压，宜取较小的减薄率。

3）偏离率。工件实际厚度 t_f 与按正弦律计算的厚度 t_t 的偏差称为偏离率。

$$\Delta = \frac{t_f - t_t}{t_f} \tag{7.3-22}$$

$\Delta>0$ 时称'正偏离'或'欠旋'，此时往往有附加拉深变形，工件精度及材料可旋性降低，法兰易起皱。$\Delta<0$ 时称'负偏离'或'过旋'，此时附加轧压变薄，旋压力急增，材料可旋性改善。Δ 值不适宜时带来的疵病见表 7.3-28。

表 7.3-28 Δ 值的影响表

Δ 值	工件形态	材料可旋性	工件精度	回弹	表面情况	旋压力
正偏离过度	凸缘前倾	下降	直径及厚度偏差均增大	增加	铝料内表面呈橘皮状	扭矩增大，工件易转动
负偏离过度	凸缘前或后倾，旋轮前隆起，反旋		直径精度略差			轴向与径向旋压分力增大

平板的锥形变薄旋压常用范围是 $\Delta = -10\% \sim +5\%$，此时延性差、厚料宜取 $\Delta<0$。

预制坯锥形变薄旋压时，薄料宜取 $\Delta \geqslant 0$；厚料与小锥角工件的 Δ 值可在 $-30\% \sim +30\%$ 的较大范围内变动。

4）旋轮数。采用 2~3 个旋轮在同一截面内工作，可以减少旋压模的弯曲和振动。

5）进给比与转速。旋压模每转一圈时旋轮沿旋压模母线移动的距离称为进给量。其数值对旋压过程有较大影响。进给量过大容易造成材料的隆起和堆积，同时由于局部变形剧烈也容易产生各类缺陷。它与零件的尺寸精度、表面光洁度、旋压力大小及坯料的减薄率等有关。

旋轮进给比

$$f = \frac{v_s}{\omega} \tag{7.3-23}$$

式中，v_s 为旋轮沿工件母线的进给速度，mm/min；ω 为主轴转速，r/min。

f 大则工效高，但以不产生振动，旋压力、表面粗糙度值不过大为限。常用选择范围为 $f=(0.1 \sim 0.75)\ n_r$ mm/r（n_r 为同步工作旋轮数），厚料及旋轮顶端圆角半径大时取大值。

主轴转速 ω 大则工效高，但以不产生振动，旋压热不过大为限，常用范围见图 7.3-29。周向线速度 v_θ 与 ω 的关系如下式

$$v_\theta = \frac{\pi D\omega}{1\,000}\ (\text{m/min}) \tag{7.3-24}$$

v_θ 的常用范围为 50~300 m/min，厚料、硬料或小直径工件取小值。

采用恒线速、恒进给比可以使变形均匀，从而改善工件表面粗糙度和尺寸精度。

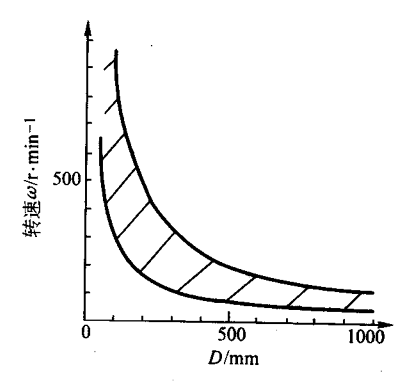


图 7.3-29 锥形变薄旋压 ω 与 D 的关系

6）旋轮工作参数。旋轮顶端圆角半径 r_r（图 7.3-30）小时旋压力小，工件贴模度好，但应以不形成粘附，以至掉屑、表面粗糙度值不过大为限。常用的选择范围是 $r_r=(1.5 \sim 4)\ t_0$。旋不锈钢、耐热合金等材料时取大值；旋厚料或铝料取小值。

旋轮攻角 β 应不小于 7~20°，以防止坯料擦伤并黏附到旋轮上，厚料或黏性料时取大值。

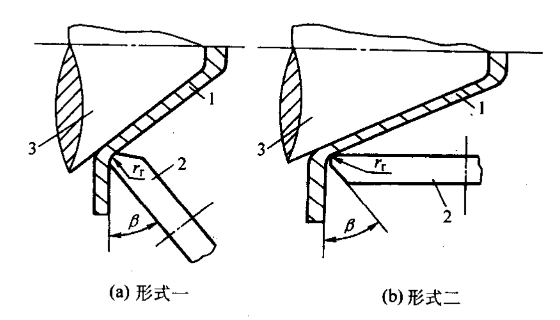


图 7.3-30 旋轮工作简图

1—坯料；2—旋轮；3—旋压模

7）润滑与冷却。所用润滑剂种类与拉深旋压时相同，但用量要大。

用厚料或硬料时，需加大冷却液的供给量。

（2）筒形变薄旋压

旋轮紧压在与旋压模同时旋转的筒形坯料上并沿坯料轴向运动，从而制出薄壁长筒形件，这种成形方式称为筒形变薄旋压。在筒形变薄旋压时，筒形坯料沿轴向变薄伸长，内径基本不变。

1）坯料。筒形变薄旋压的变形过程如图 7.3-22c、d 所示。

坯料变形部分的壁厚 t_0 及长度 l_0 可由式（7.3-11）或（7.3-12）计算。t_0 大则坯料短，机械加工方便，但应以旋压力不过大，旋压道次及中间热处理次数不要太多为宜。

厚壁坯料起旋处形状应与旋轮工作部分的形状吻合。坯料带厚底时，起旋处宜越过底部（图 7.3-31）。

在第一道次，终旋点位置宜距坯料尾端（1.5~6）t_0 以上，在随后的道次宜距前一道次的终旋点 1~3 mm 以上（图 7.3-32）。

当零件带有厚法兰时，在法兰和旋压段之间应设置卸荷段（图 7.3-33）。法兰的单侧机加留量：运动端应不小于 3~8 mm，非运动端应不小于 1.5~3 mm。径向的机加留量应不小于每侧 1~1.5 mm。



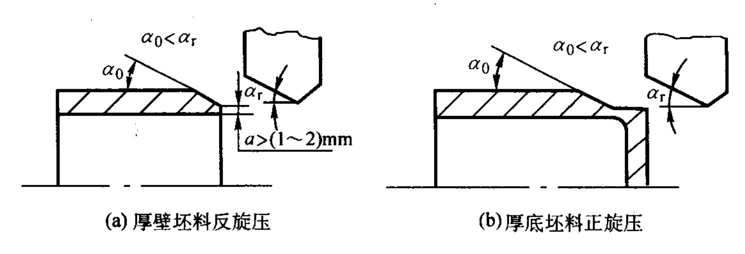


图 7.3-31 筒形坯料起旋处示例

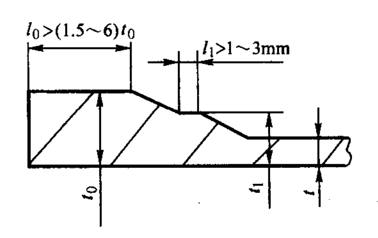


图 7.3-32 筒形变薄旋压时终旋处尺寸简图

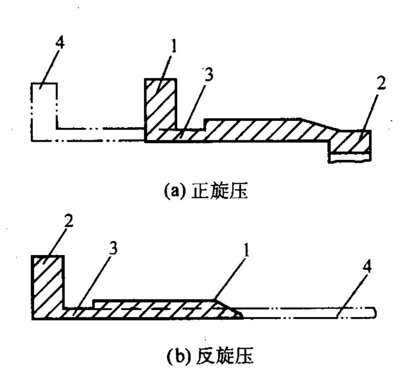


图 7.3-33 带厚法兰工件的筒形变薄旋压

1—坯料运动端；2—坯料非运动端；3—坯料卸荷槽；4—工件

在筒形变薄旋压中，筒形坯料与旋压模的直径间隙越小越能保证上料对中，中小件的直径间隙通常取 0.05 ~ 0.2 mm，大件则需达 1 mm 以上。

对于需要先进行锥形变薄旋压的复合变薄旋压（图 7.3-34），筒形段直径间隙需加大到 0.5 ~ 8 mm，厚料或中大件时取大值。

2）正、反旋压。筒形变薄旋压有两种形式，材料流动方向与旋轮移动方向一致的称为正旋（图 7.3-35a），材料流动方向与旋轮移动方向相反的称为反旋（图 7.3-35b）。正旋压适应面较宽，所需旋压力较小，直径精度一般优于反旋压。反旋压的旋压模及旋轮工作行程较短，但其应用一般限

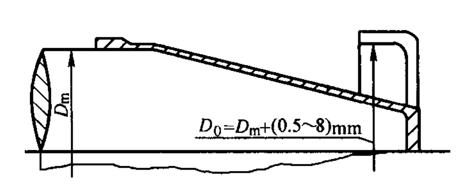


图 7.3-34 锥—筒复合件的变薄旋压

于不带底的工件。

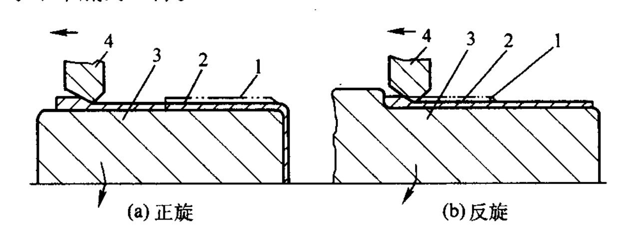


图 7.3-35 筒形变薄旋压

1—坯料；2—工件；3—旋压模；4—旋轮

3）旋轮布置。根据机床条件，单轮工作只适于薄料或粗而短的工件。当双轮旋压细长件时，容易出现旋压模跳动。三轮旋压结构最为合理，三轮均布又优于三轮的不均匀分布。

4）减薄率。筒形变薄旋压的极限减薄率与锥形变薄旋压时大体相当（表 7.3-26），但实际应用时应考虑工件精度、机床能力及系统刚度等因素。常用的选择范围为 15% ~ 45%，在反旋、软料、旋轮不带引导段时取小值。一道次减薄率的理论适宜值为

$$\psi_{top}{}^{t} = \frac{2\sin\alpha_r}{1+2\sin\alpha_r}\left(1-\frac{f}{4t_0\cos\alpha_r}\right) \quad (7.3\text{-}25)$$

式中，α_r 为旋轮成形角，见下述。按式（7.3-25）绘制的图线示于图 7.3-36。

多道次旋压时的极限减薄率大于一道次旋压的极限减薄率。当总减薄率不超过极限值时，通常不加中间退火。

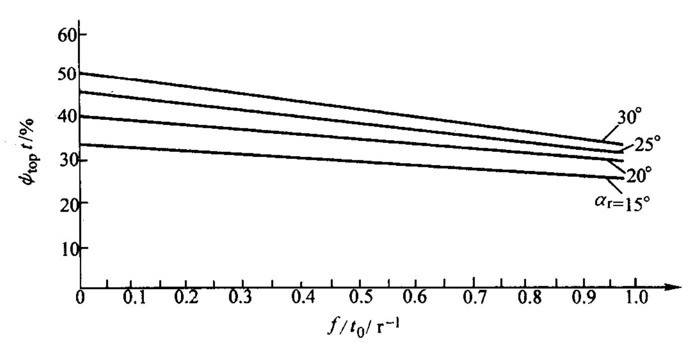


图 7.3-36 f/t_0、α_r、$\psi_{top}{}^t$ 值的关系曲线



5）进给比与转速。旋轮的进给比选择合理，可获得良好的成形状态。进给比 f 的影响与锥形变薄旋压时相近，而且对直径精度有影响。f 值过小时易扩径，过大时易隆起，都对直径精度不利。通常 f 值过大，则抱模过紧，影响卸件。软料反旋时，f（mm/r）值过大则出现喇叭口和扩径。正旋压时常用的选择范围是 $f=(0.25\sim1.0)\ n_r$（n_r 为同步工作旋轮数），薄料取小值；反旋压时常用的选择范围是 $f=(0.1\sim0.5)\ n_r$，软料取小值。

多道次旋压时，常使前期道次的 f 足够大，使工件抱模；终旋时，则使 f 值略减小，以利卸件。

当坯料不规则时，可在头道次取小的减薄率与大的进给比进行校正。

转速 ω 的选择如锥形变薄旋压。

6）旋轮形状与工作参数。筒形变薄旋压所用的旋轮外形有多种形状。旋轮工作部分常用外形如图7.3-37。

r 型用于软料及带锥形或筒形的复合件。旋轮圆角半径通常不小于（15～25）ψt_0。

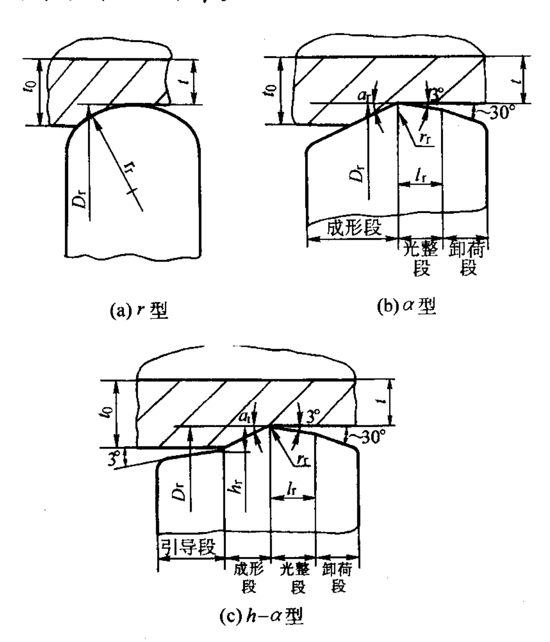


图 7.3-37 旋轮的常用外形

后两种为常用型。$t_0\geqslant5$ mm 左右时，为避免在旋轮前形成隆起或堆积则采用 $h-\alpha$ 型旋轮。

成形角 α_r 过小时易扩径，过大时易隆起，常用的选择范围是15°～30°，钢件取25°～30°，软料取较小值。圆角半径 r_r 的影响同锥形变薄旋压，常用范围为 $l_r=0$ 时，$r_r\approx(0.6\sim1.6)\ t_0$，硬料取小值；$l_r>0$ 时，$r_r\approx\sqrt{t_0}$（t_0 的单位为mm，r_r 的单位也为mm）。

其他常用值是：引导角 $\gamma=3°$，台阶高 $h\approx(1.05\sim1.3)\ \psi t_0$，光整段长 $l_r\geqslant(1\sim2)\ f$，卸荷角 $\beta=30\sim45°$。

旋压长管时将旋轮斜置，使 $\phi=2\sim3°$（图7.3-38），则产生轴向分速度 $v_x=\pi D\omega\tan\phi$，有助于坯料的纵向流动，提高工件精度，并降低旋压力。但 ϕ 值过大，会造成表面粗糙和振动。

7）润滑与冷却。与锥形的变薄旋压相同。

2.3 变薄旋压的工装设计

变薄旋压所采用的工艺装备主要包括旋轮装置、旋压模、尾顶装置及靠模等等。

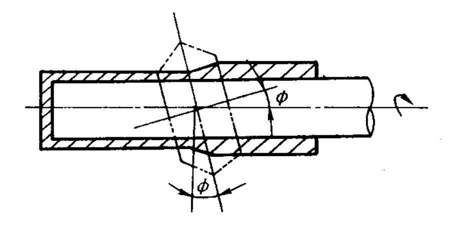


图 7.3-38 旋轮斜置简图

（1）旋轮

当工件成形时的旋压力和弯矩较小时，可采用单轮工作，在相反情况或工件的精度要求较高时，宜采用二个或三个沿周向均布的旋轮进行工作。

变薄旋压与其他压力加工方法相比较，所需工艺装备结构简单，成本低廉，所需费用为拉深的1/4～1/6，冷挤压的1/3～1/4。

旋轮装置由旋轮、旋轮支架、轴承等部分组成，可成套更换使用。在有些旋压机中，只更换旋轮即可。

变薄旋压时旋轮与坯料间单位接触压力可高达（1～3.5）×10³ MPa，故旋轮一般须整体淬硬。常用CrWMn、9CrSi、Cr12MoV、LM1等合金工具钢以及高速钢，硬质合金，淬硬到HRC60～63。

根据旋压机床的不同，旋轮外径的常用范围是 $D_r=120\sim350$ mm。D_r 值大时有助于限制坯料横向流动及扩径，也有利于增大旋轮轴承，并提高其寿命。旋轮安装后，空载时的径跳一般应不大于0.01～0.02 mm。

旋轮架分为单臂式和双臂式，轴承可安装于支臂上，也可装于轮上（图7.3-39）。单臂式旋轮架便于更换旋轮。

旋轮尺寸的具体选择，可参见本章2.2第（2）小节。

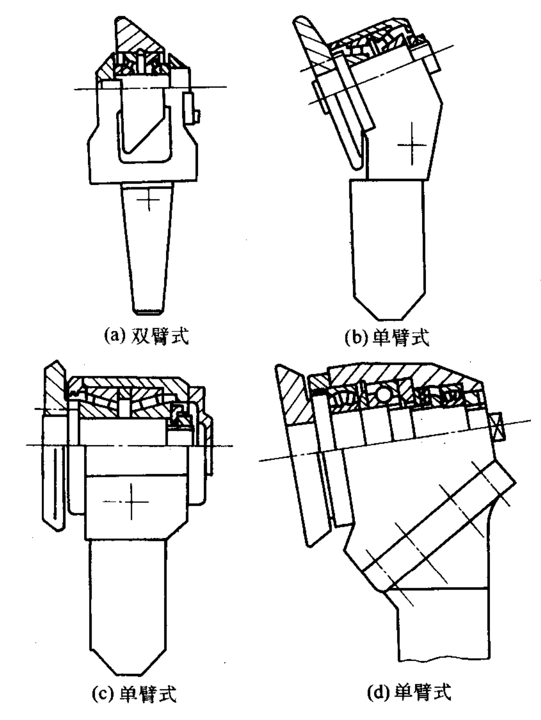


图 7.3-39 旋轮架示例

（2）旋压模

旋压模是旋压过程中的主要成形工具。其表面上承受较大的局部作用力，同时，金属材料变形时沿旋压模流动会产生很大摩擦。因此，旋压模要有足够的强度和刚度及良好的耐磨性，还应有较好的表面粗糙度。

旋压模工作段一般包括名义段 L_1、装卸段 L_2，筒形模则还需包含增长段 L_3（图 7.3-40）。确定 L_3 时，应考虑坯料壁厚误差及调整偏差可能造成的工件伸长。

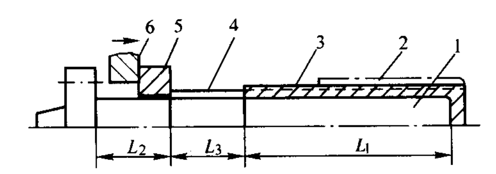


图 7.3-40 筒形模工作部分

1—旋压模；2—坯料；3—工件（名义段）；4—工件（增长段）；5—脱卸环；6—脱卸器

算例：已知坯料 $t_0=2$ mm，$l_0=1\ 200$ mm，工件成形后 $t=1.2$ mm，$l=2\ 000$ mm。坯料偏厚 $\Delta t_0=0.2$ mm，则

$$L_3 \approx \frac{l_0 \Delta t_0}{t}=\frac{1\ 200\times 0.2}{1.2}\ \text{mm}=200\ \text{mm}$$

当工件偏薄 $\Delta t=0.2$ mm，则

$$L_3 \approx \frac{l\Delta t}{t_0}=\frac{2\ 000\times 0.2}{2}\ \text{mm}=200\ \text{mm}$$

旋压模端部圆角半径取 $r_m \geqslant (0.5\sim1)\ t_0$。

多道次旋压时，各道次模具端部应保持协调（图 7.3-41），取

$$d_{mn}=d_{m0}+2r_m\left(\frac{1-\sin\alpha_{mn}}{\cos\alpha_{mn}}\right) \tag{7.3-26}$$

式中，n 为旋压道次数。

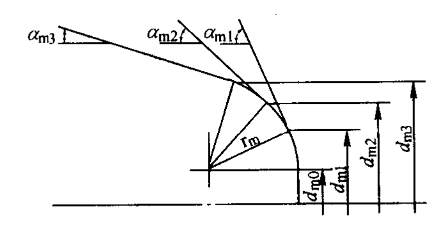


图 7.3-41 多道次锥形变薄旋压时模具的端部尺寸

模具型面尺寸的确定与普通旋压时相同。随工件大小和要求不同，模具安装后空载时径跳应不大于 0.01 ~ 0.1 mm。

厚壁坯料筒形变薄旋压初期道次扩径较大时，后期道次可采用直径相对增大的旋压模，以保持模具与坯料的间隙不致过大。

旋压模材料的选择，要根据工件的批量、坯料的性质及成形的方式等确定。具体可参见表 7.3-19。

（3）尾顶

尾顶的作用除了顶紧坯料外，有时还要参与某些成形工作。尾顶可以增加旋压模的刚性和稳定性，有时还可以起到装料或卸件的作用。

尾顶装置的结构有多种形式，主要取决于工件的形状结构。中小尺寸的工件多采用尾顶块、尾顶尖、尾顶杆或者其组合形式。

图 7.3-42 是正旋时的几种典型尾顶形式。图 c 所示的尾顶块优于图 a、b，图 d 和图 e 所示尾顶块用于管坯正旋。

当尾顶力不足时，可在旋压模端面加止动销，以防止坯料转动。

工件带尖顶时，难以设置尾顶，可以用图 7.3-43 的装置来支撑坯料。

2.4 变形力

通过计算变形力，可以了解旋压过程中力、应变－应力的状态及变化规律，为正确选择旋压设备和工具，合理制订工艺规程提供依据。还可以为改进旋压工艺，充分发挥生产潜力提供帮助。旋压力的计算一般可采用下面的方法。

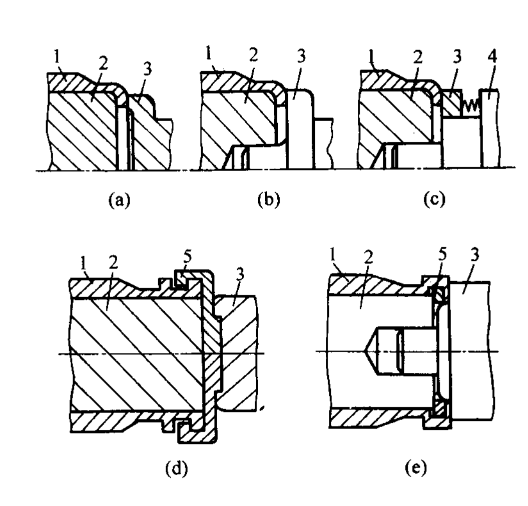


图 7.3-42 正旋时的几种典型尾顶形式

1—坯料；2—旋压模；3—尾顶块；4—定心杆；5—半环

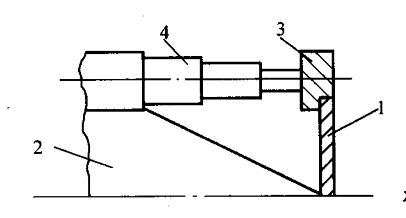


图 7.3-43 带尖顶锥形件变薄旋压时坯料的定位方式

1—坯料；2—旋压模；3—定位盘；4—伸缩轴

（1）模拟试验求解

步骤同普通旋压。因变薄旋压时工件直径对旋压力的影响较小，在确定模拟试验参数时，可仅就壁厚因素作局部模拟。

（2）能量法图算求解

平板锥形变薄旋压的三向旋压分力（图 7.3-44a）及主功率可按下式近似计算

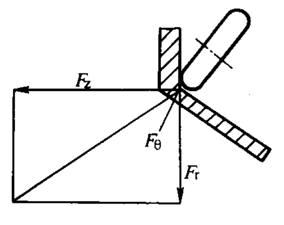
$$\begin{aligned} F_z &= K_1 t_0 \sigma_0 \\ F_r &= K_2 K_1 t_0 \sigma_0 \\ F_\theta &= K_3 t_0 \sigma_0 \\ P &= K_4 K_3 t_0 \sigma_0 \end{aligned} \tag{7.3-27}$$

式中，F_z 为轴向分力，N；F_r 为径向分力，N；F_θ 为周向分力，N；P 为主轴功率，kW；t_0 为坯料厚度，mm；σ_0 为坯料平均屈服点，MPa，先由减薄率 Ψ_t 确定真实应变 ε_e（图 7.3-45），再由相应的真实应力 σ_e 按 $A_1=A_2$（图 7.3-46）确定 σ_0，部分材料的真实应力应变曲线见图 7.3-47；K_1、K_2、K_3、K_4 为系数，可分别由图 7.3-48、49、50、51 查得。三向分力之间的关系是 $F_z > F_r >> F_\theta$。

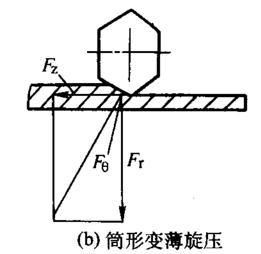
例：已知 $t_0=3$ mm，$\sigma_0=200$ MPa，$\alpha=30°$，$D/2=400$ mm，$f=1$ mm/r，$r_r=10$ mm，$\omega=400$ r/min，$D_r=260$ mm，$\beta=20°$，$n_r=1$。

可分别查得 $c=3.2$，$a^2=15.2$，$b^2=445$，$e=29$，$K_1=11$，$K_2=0.63$，$K_3=0.5$，$K_4=4.2\times10^{-3}$。





(a) 锥形变薄旋压



(b) 筒形变薄旋压

图 7.3-44 三向旋压分力

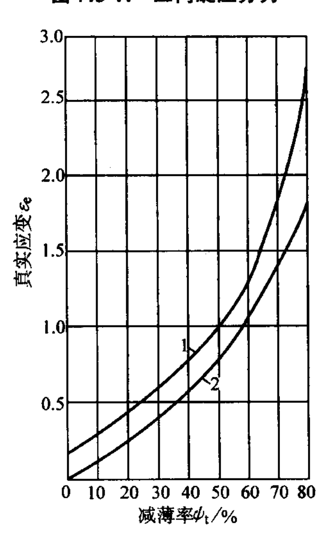


图 7.3-45 $\psi_t-\varepsilon_e$ 关系曲线

1—锥形变薄旋压；2—筒形变薄旋压

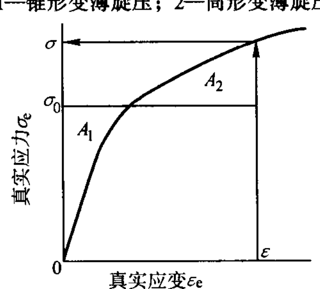


图 7.3-46 由 $\sigma_e-\varepsilon_e$ 曲线求 σ_0

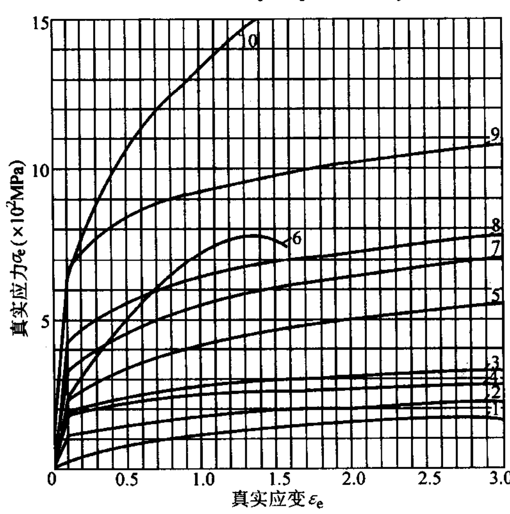


图 7.3-47 部分材料的真实应力－应变曲线

1—纯铝；2—LF21M；3—LF2M；4—LY12M；5—T2；6—H70；7—10；8—20；9—30CrMnSi；10—1Cr18Ni9Ti

从而求得

$$F_z=11\times3\times200\ \text{N}=6\ 600\ \text{N}$$
$$F_r=0.63\times6\ 600\ \text{N}=4\ 158\ \text{N}$$
$$F_\theta=0.5\times3\times200\ \text{N}=300\ \text{N}$$
$$P=4.2\times10^{-3}\times300\ \text{kW}=1.26\ \text{kW}$$

筒形变薄旋压的三向分力（图 7.3-44）可按下式近似计算

$$\begin{aligned}F_r&=K_5K_6t_0\sigma_0\\F_z&=K_7F_r\\F_\theta&=K_8F_r\\P&=n_rK_4F_\theta\end{aligned}\qquad(7.3\text{-}28)$$

系数 $K_5\sim K_8$ 可分别由图 7.3-52、53、54、55 查得。在图 7.3-52 中正旋时查得 K_{5f}，反旋时查得 K_{5b}。图中摩擦因数 $m=0.1\sim1$。α_r'由图 7.3-56 查得。

例：已知 $t_0=3$ mm，正旋 $\psi_t=0.26$，$\sigma=410$ MPa，$D_r=140$ mm，$\alpha_r=30°$，$r_r=4$ mm，$f=0.5$ mm/r，$n_r=2$，$D_0=90$ mm，$\omega=400$ r/min。

可分别查得 $\alpha_r'=17°$，$K_{5f}=0.91$（取 $m=0.69$），$K_6=10$，$K_7=0.31$，$K_8=0.02$，$K_4=2\times10^{-3}$。

从而求得

$$F_r=0.91\times10\times3\times410=11\ 193\ \text{N}$$
$$F_z=0.31\times11\ 193=3\ 469\ \text{N}$$
$$F_\theta=0.02\times11\ 193=224\ \text{N}$$
$$P=2\times2\times10^{-3}\times224=0.9\ \text{kW}$$

2.5 特殊旋压方式

（1）锥形变薄旋压——内旋压

过程如图 7.3-57 所示，工件的厚度变化符合正弦律。可用于制造抛物线型天线罩等大型件。变形区为两向受拉，一向受压。对纯铝的试验表明：一道次旋压的极限减薄率约为 50%左右，低于外旋压。优点是回弹小，尺寸精度好，可无模旋压。

（2）椭圆锥的锥形变薄旋压

图 7.3-58 是借凸轮－齿轮－摆杆系统实现的旋压过程简图。用 2 mm 厚铝板制成高 60 mm 的椭圆锥，小端长轴 120 mm，半锥角 20°，小端短轴 90 mm，半锥角 25.9°。采用的旋轮 $D_r=104$ mm，$r_r=10$ mm。在旋压过程中，进给速度较慢（$f\leqslant0.3$ mm/r），以避免产生皱纹或破裂。

（3）张力旋压法

张力旋压法就是在强力旋压过程中，沿被旋压的工件材料延伸方向施加轴向恒定的张力（拉力），以利于材料的轴向流动；这样可减小材料隆起、扩径、弯曲，并提高极限减薄率，获得较高的尺寸精度。张力旋压法特别适于细长比较大的管子旋压。但需有保持张力稳定的特殊装置，目前已有此类专用机床。

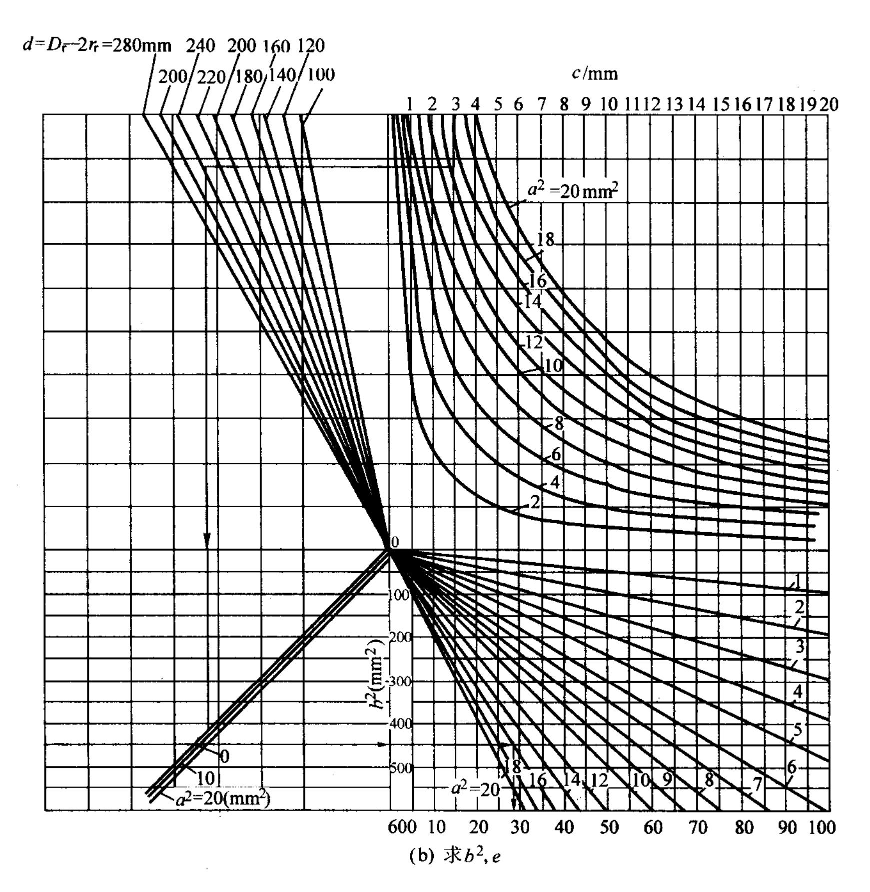
在进行张力旋压时，由张力引起的拉应力应低于材料的屈服极限。一般为（0.2～0.5）σ_s。

张力旋压的工作原理见图 7.3-59。图 a 为在短旋压模上进行正旋。在旋压时，旋轮和旋压模保持相对位置不变，而对已旋出的管子端由一根通过旋压模及其空心连接杆的顶杆和顶块施加推力 P，从而使得旋压工件上产生张力（拉应力）。这个方案的优点是，可采用短的旋压模，避免长旋压模的制造难度。图 7.3-59b 则为反旋情况下进行张力旋压。由图可见，它是在一般反旋的基础上，对已旋出的管端施加拉力 P。它具有反旋和张力旋压的优点。

张力旋压的方案有很多种，包括正旋压或反旋压，加前张力、后张力，用长旋压模、短旋压模或局部模等不同类型，是一种生产高精度、高表面质量管材的加工方法。



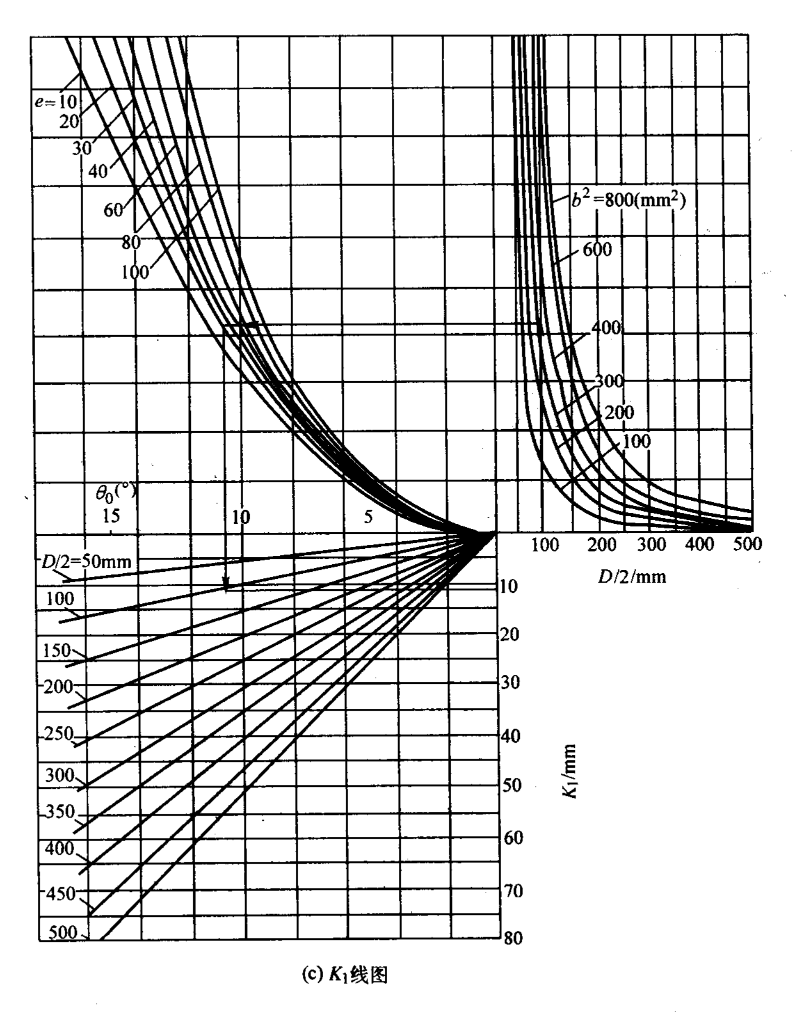
(a) 求c、a^2



(b) 求b^2, e

图 7.3-48　K_1 线图





(c) K_1线图

续图 7.3-48 K_1 线图

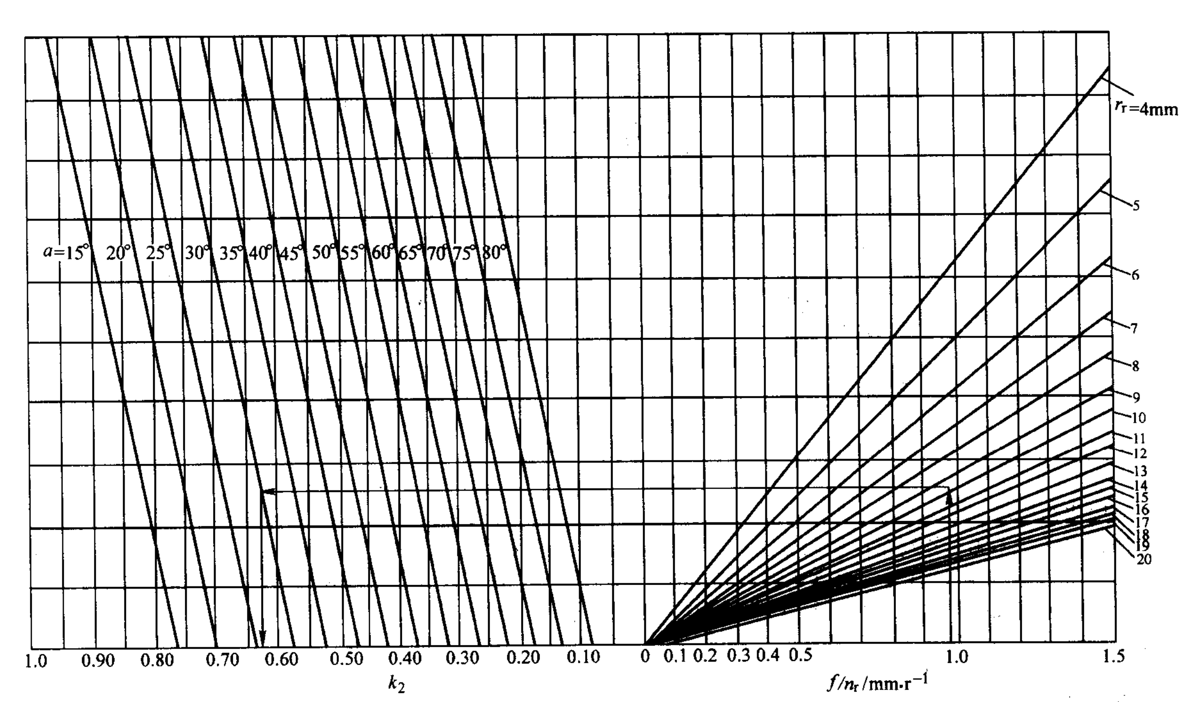


图 7.3-49 K_2 线图



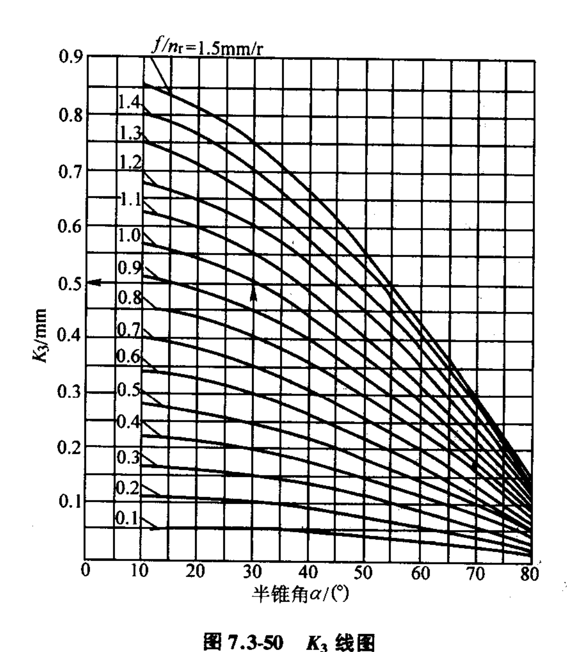


图 7.3-50 K_3 线图

图 7.3-51 K_4 线图

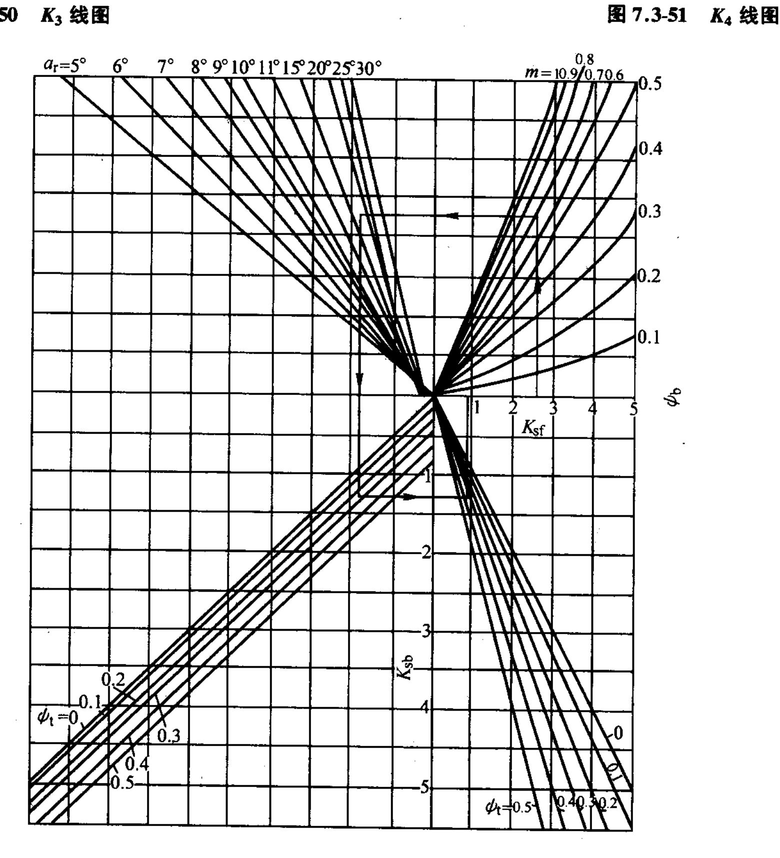


图 7.3-52 K_5 线图

（4）分层错距旋压

工作原理见图 7.3-60。各旋轮在径向分层，并在轴向错开一定距离，可以在一道次中完成通常需几道次完成的工作，使工效成倍地提高并可提高工件直径精度，减少弯曲度及口部喇叭口长度。但总旋压力及主轴功率则相应增大。在正旋压时，错距不分层亦可达到提高精度的效果。

坯料起旋处应预制与多旋轮工作相应的台阶。径向压下量的分配应使各旋轮受力大体相当。总压下量可达到材料的极限减薄率。

分层错距旋压在均布三旋轮旋压机上已获得广泛应用，在双旋轮旋压机上亦可采用。

在进行分层错距旋压时，各旋轮压下量的分配应使其旋压力大致相同。

旋轮型面参数取

$$r_{r1} \geqslant r_{r2} \geqslant r_{r3}$$
$$a_{r1} \leqslant a_{r2} \leqslant a_{r3} \qquad (7.3\text{-}29)$$

式中，1、2、3 为按先后工作顺序排列的旋轮号。

错距量 a 应尽量小，但不使后轮成形面越过前轮，保持

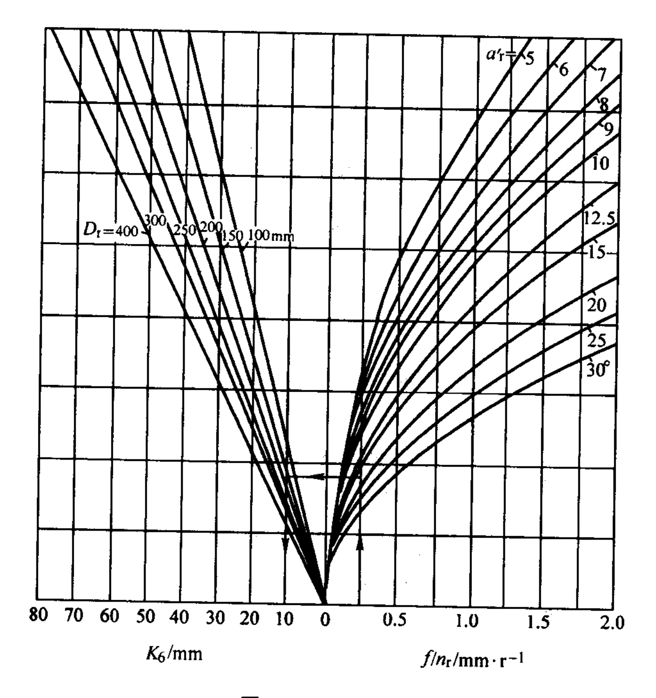


图 7.3-53　K_6 线图

图 7.3-54　K_7 线图

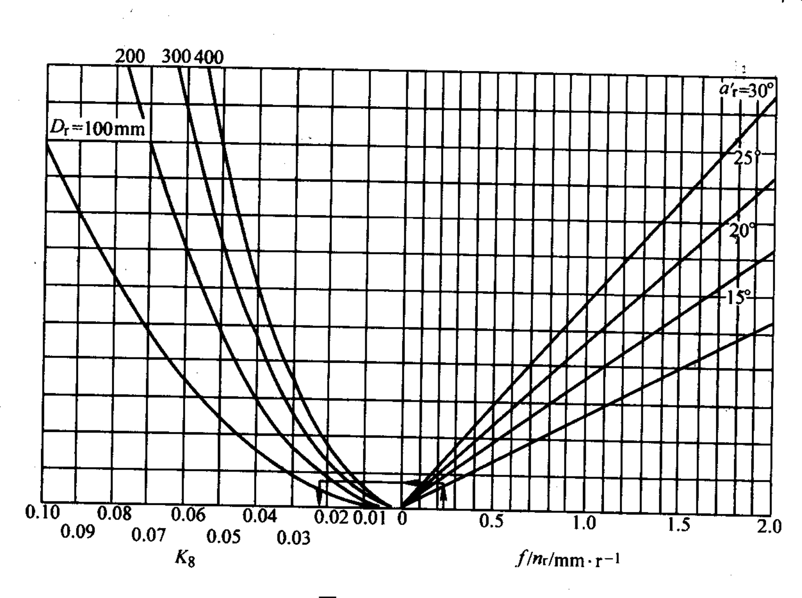


图 7.3-55　K_8 线图

$$a \geqslant a_{\mathrm{I}} + a_{\mathrm{II}} + a_{\mathrm{III}} \tag{7.3-30}$$

式中，a_{I} 为几何位置错距量，可作图确定，图 7.3-61 示出 a 不同的情况；a_{II} 为实际进给附加值；a_{III} 为可能的调整误差。

双轮正旋压时，附加值为

$$a_{\mathrm{II}_{12}} = \frac{f}{2}(1-\psi_{t2}) \tag{7.3-31}$$

双轮反旋压时，附加值为

$$a_{\mathrm{II}_{12}} = \frac{f}{2(1-\psi_{t1})} \tag{7.3-32}$$

三轮正旋压时，附加值为

$$a_{\mathrm{II}_{12}} = \frac{f}{3}(1-\psi_{t3})(1-\psi_{t2}) \tag{7.3-33}$$

$$a_{\mathrm{II}_{23}} = \frac{f}{3}(1-\psi_{t3})$$

三轮反旋压时，附加值为

$$a_{\mathrm{II}_{12}} = \frac{f}{3(1-\psi_{t1})}$$

$$a_{\mathrm{II}_{23}} = \frac{f}{3(1-\psi_{t1})(1-\psi_{t2})} \tag{7.3-34}$$

以上 ψ_t 的脚标如前述。

(5) 滚珠（钢球）旋压

滚珠旋压是因多轮旋压的发展而演变出来的旋压方法。其原理见图 7.3-62，其中图 a、b 分别为正、反旋。因滚珠数量多且均布，故旋压力的平衡性及变形均匀性均优于滚轮旋压，特别适于旋制薄壁细长管，通常壁厚范围为 0.05 ~ 0.5 mm，直径最小可达 2 ~ 3 mm。其优点是直径精度高，可达 IT6 ~ 7 级，表面粗糙度值可达 $R_z \leqslant 1.5\ \mu m$。缺点是工效较低，滚珠消耗较大。

每道次减薄率常取 $\psi_t = 20\% \sim 25\%$。

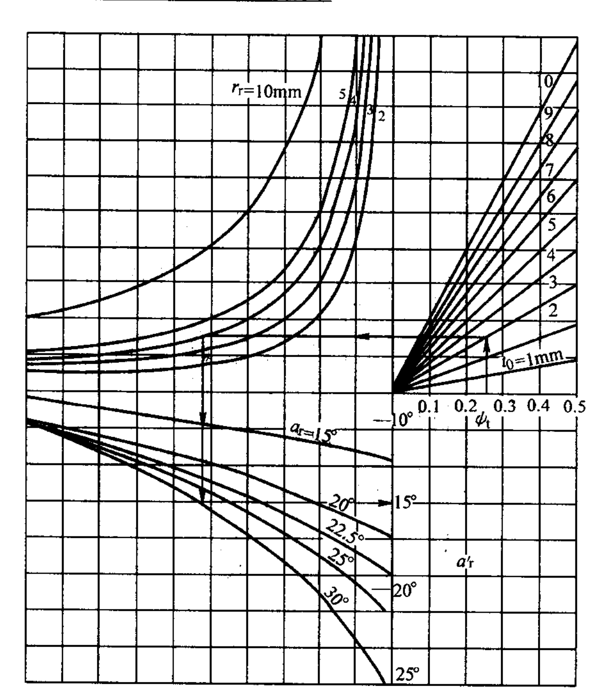


图 7.3-56　α_r' 线图

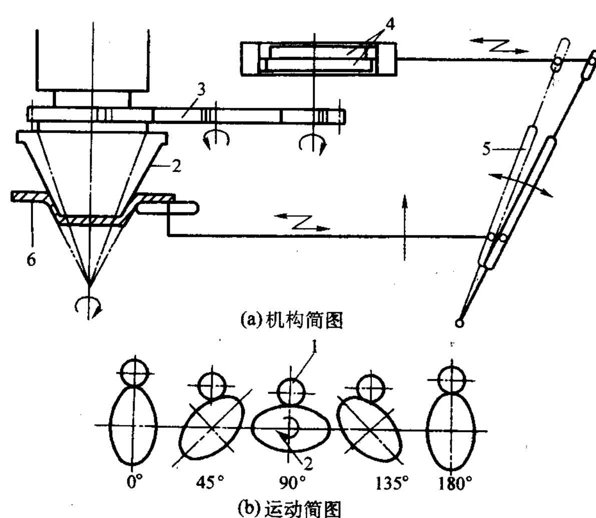


图 7.3-57　锥形变薄旋压——内旋压简图

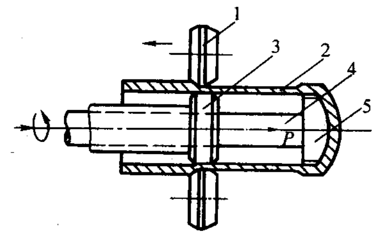
1—旋轮；2—坯料；3—工件；4—模具；5—夹头

(a)机构简图

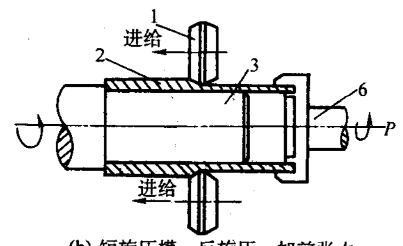
(b)运动简图

图 7.3-58　椭圆锥的锥形变薄旋压

1—旋轮；2—旋压模；3—齿轮链；4—双凸轮；5—摆杆；6—工件



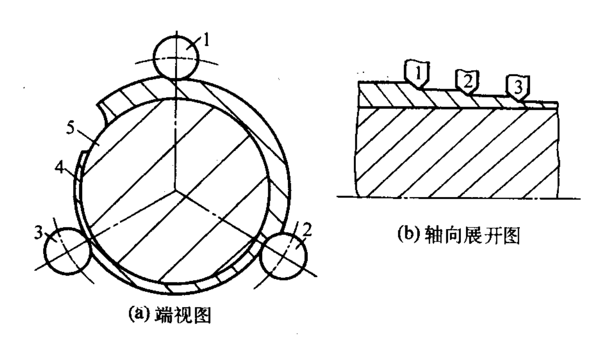
(a) 局部模，正旋压，加后张力



(b) 短旋压模，反旋压，加前张力

图 7.3-59　张力旋压简图

1—旋轮；2—工件；3—旋压模；4—顶杆；5—顶块；6—卡头

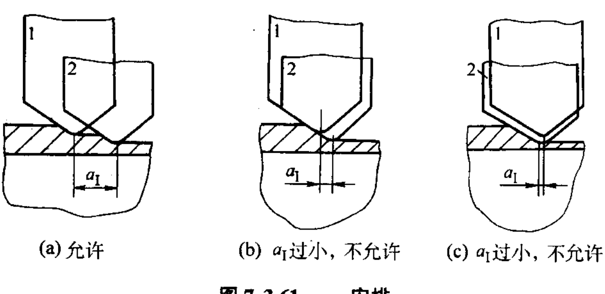


(a) 端视图

(b) 轴向展开图

图 7.3-60　分层错距旋压简图

1、2、3—旋轮；4—坯料；5—旋压模

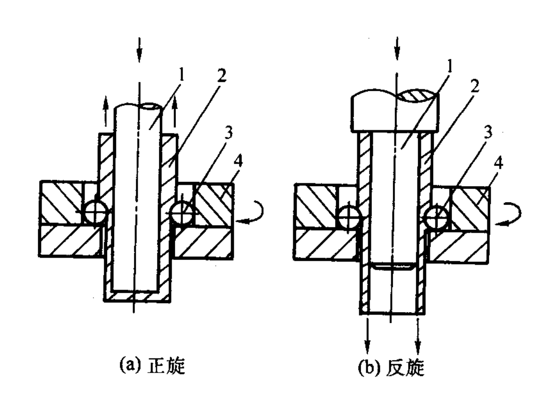


(a) 允许

(b) a_I过小，不允许

(c) a_I过小，不允许

图 7.3-61　a_I 安排



(a) 正旋

(b) 反旋

图 7.3-62　滚珠旋压

1—旋压模；2—工件；3—滚珠；4—滚珠盘



进给比 f (mm/r) 按式 (7.3-35) 计算

$$f \leqslant [c(1-\Psi_t)]^4 \qquad (7.3\text{-}35)$$

系数 c 按表 7.3-29 选择，注意 f 过小时易产生扩径。

表 7.3-29 c 值

材料	3A21	2A12	45	10	1Cr18Ni9Ti
c	0.45	0.47	0.49	0.51	0.55

滚珠直径

$$D_b = \frac{2(t_0 - t)}{1 - \cos\alpha_{ri}} \qquad (7.3\text{-}36)$$

式中，α_{ri}为滚珠工作区入口处成形角，见图 7.3-63。常用的选择范围是 $\alpha_{ri}=16°\sim26°$，铝合金取小值，一般钢取 20°～22°，不锈钢取大值。

D_b 过小则表面不光，过大则母线不直。$D_b/(t_0-t)$ 较小则产生剥皮，增大材料损耗（图 7.3-64）。但当对工件表面粗糙度有较高要求时，则应使旋压过程中有一定的剥皮率。

$$\psi' = \Delta t'/t_0 \qquad (7.3\text{-}37)$$

式中，$\Delta t'$为剥皮层厚。

旋压高精度管时，同一盘滚珠的直径差应不大于 0.002 mm。一般滚珠的数量 n_b 要保证各滚珠的间隙 $z_b \geqslant 0.0025D_b$，如图 7.3-65。

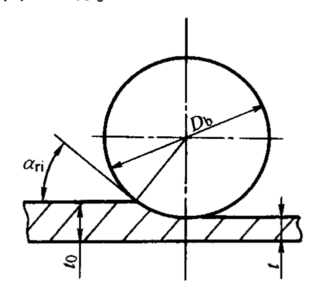


图 7.3-63 滚珠工作区

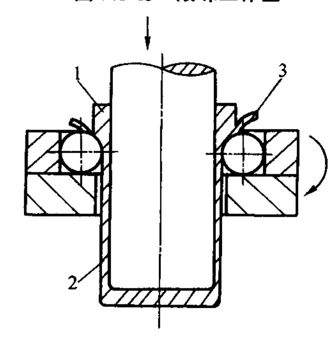


图 7.3-64 剥皮滚珠旋压加图

1—未成形段；2—已成形段；3—剥皮层

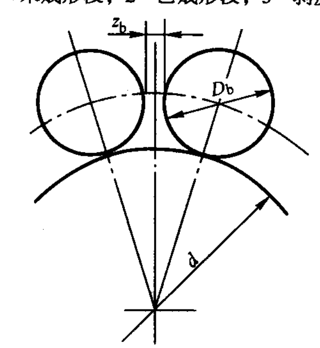


图 7.3-65 滚珠安排

滚珠数按下式计算：

$$n_b \leqslant \frac{\pi}{\arcsin\left(\frac{0.5D_b}{d+D_b}\right)} \qquad (7.3\text{-}38)$$

滚珠盘可做成可调式的（图 7.3-66），以便于工艺调整和减少珠盘的更换次数。调节壳体 1 的拧入量，可以旋压变壁厚管件。

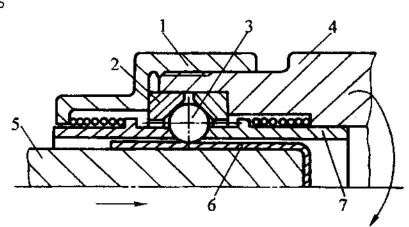


图 7.3-66 可调式滚珠盘

1—外套；2—滚珠环；3—滚珠；4—壳体；5—旋压模；6—工件；7—分离环

(6) 浮动芯模法

浮动芯模法适用于筒形件的成形加工。该方法采用的芯模长度尺寸较小，两端不固定，加工、制造和安装非常容易，由于该方法是采用旋轮不动，工件做轴向运动，故解决了正旋所带来的工件扭曲的问题。此法用于加工长管类件，更显示出它的优越性，对改善管类件的加工具有重要的意义。

按传统的方法，对筒形件的加工一般采用芯模旋压成形。芯模旋压必须有一根与所旋工件相匹配的芯棒。为了保证所旋工件的质量，芯棒必须有足够的强度、刚度和表面质量。这样芯模的加工制造就非常困难，芯模的费用较高。在正旋时，由于工件存在着扭曲变形问题，旋完后的工件放置一段时间，形状和尺寸会发生变化，严重影响工件的质量。采用对轮旋压工艺，就是把传统的芯棒换成旋轮，应用内外旋轮的结构，这在一定程度上解决了芯棒所带来的问题，但内旋轮的安装，内外旋轮的调整都比较麻烦，在一定程度上限制了此工艺的应用。

浮动芯模法是一种介于芯模旋压和对轮旋压之间的工艺，浮动芯模的结构如图 7.3-67 所示。工件外径的成形采用旋轮，内径采用芯棒，这和传统的芯模旋压一样，但二者之间又有区别，浮动芯模旋压采用的芯棒长度尺寸比较短，同时在旋压过程中芯棒是随变形的进行而在浮动，省去了传统芯模旋压中芯棒必须和工件的长度相一致，以及芯棒安装固定的问题；浮动芯棒比较小，同时又在不停的运动，这和对轮旋压中的内旋轮的作用相似。

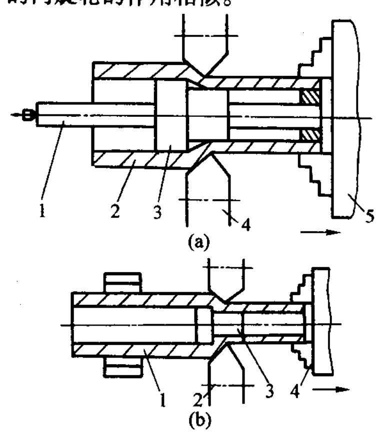


图 7.3-67 浮动芯模的结构

(a) 1—导轨；2—坯料；3—浮动芯模；4—旋轮；5—卡盘

(b) 1—坯料；2—旋轮；3—浮动芯模；4—卡盘

编写：李东平（吉林大学）

第4章 超塑成形

1 超塑性成形技术基础

1.1 定义、特征及特点

(1) 超塑性的定义

作为衡量塑性优劣重要指标的伸长率，一般金属均不超过百分之几十。如黑色金属不大于40%，有色金属不超过60%（软铝约为50%，而金、银一般也只有80%），即使在高温下，也难以达到100%。

"超塑性"就是超出一般塑性指标的金属特性。在特定的内在条件（如材料成分、组织及相变能力等）和外在条件（如温度、加热方式、压力及应变速率等）下，某些金属呈现出大大超过一般塑性的特异性能，其伸长率值可超过百分之百，甚至达到百分之几千也不会产生缩颈现象，同时变形抗力很小，这种无缩颈和异常高的伸长率（即 δ 值）的特征，通称为超塑性。

在工程上通常将 $\delta > 100\%$ 的变形称之为超塑性变形，该材料称之为超塑性材料，利用这种特性的成形方法称之为超塑性成形。

根据目前世界上各国学者研究的结果，按照实现超塑性的条件（如组织、温度、应力状态等），超塑性主要分为微晶组织超塑性及相变超塑性两类，见表7.4-1。目前研究得最多，在生产上应用最多的是微晶组织超塑性。

表7.4-1 组织超塑性与相变超塑性

名 称	内部条件	外在条件	应 用
微晶组织超塑性（即恒温或结构超塑性）也称静态超塑性	1）微晶粒化 晶粒尺寸 $d \leqslant 10\ \mu m$（最好 $1 \sim 1.5\ \mu m$） 2）晶粒等轴化 $\frac{d_L（晶粒纵向直径）}{d_T（晶粒横向直径）} = 1.3 \sim 1.4$ 3）晶粒热稳定性好 在变形过程中，晶粒长大缓慢，能满足变形的时间要求	1）变形温度 $T > 0.5T_m$（T_m 为材料熔点绝对温度），并在变形中保持恒定 2）应变速率（$\dot{\varepsilon}$） $\dot{\varepsilon} = 10^{-4} \sim 10^{-1} s^{-1}$，比普通金属拉伸试验时至少低一个数量级	是目前国内外研究最多、应用最广泛的一种
相变超塑性（即变温或变态超塑性）也称动态超塑性或环境超塑性	不要求材料有细晶粒组织，但要求材料具有良好的固态相变特性	1）金属及合金具有固态结构转变能力 2）有应力作用 3）在相变温度上循环加热冷却，诱发产生反复的结构变化	由于所要求温度变化频繁迅速，除应用于扩散连接、热处理和切削加工外，用的不多

除微晶组织超塑性与相变超塑性外，近年来发现普通非超塑性材料在一定条件下快速变形时，也能显示超塑性。例如标距25 mm的热轧低碳钢棒快速加热到 $\alpha + \beta$ 两相区，保温5～10 s，快速拉伸，其伸长率可达到100%～300%。这种短时间内的超塑性可称为短暂超塑性。短暂超塑性是在再结晶及组织转变时的极不稳定显微组织状态下生成等轴超细晶粒，并在此短暂时间内快速施加外力才能显示出超塑性。有些材料在消除应力退火过程中，在应力作用下也可以得到超塑性。此外，国外正在研究的还有升温超塑性。

(2) 变形特征

1) 宏观特征

① 大变形。超塑性材料在单向拉伸时伸长率极高（按国外报道，有的可高达5 000%），表明超塑性材料在变形稳定性方面要比普通材料好得多。这样使材料成形性能大大改善，可以使许多形状复杂，一般难以成形的材料（如某些钛合金）的变形成为可能。目前常用的钛合金Ti-6Al-4V的延伸率可达2 000%。

② 无缩颈。一般金属材料在拉伸变形过程中，出现早期缩颈后，由于应力集中效应使缩颈继续发展，导致提前断裂。拉断后的样品具有明显的宏观缩颈。超塑性材料的变形却类似于粘性物质的流动，没有（或很小）应变硬化效应，但对变形速度敏感，有所谓"应变速率硬化效应"，即当变形速度增加时，材料会强化。因此，超塑材料变形时虽有初期缩颈形成，但由于缩颈部位变形速度增加而发生局部强化，而其余未强化部分继续变形，结果获得巨大的宏观均匀的变形。因此，超塑性材料的变形具有宏观"无缩颈"的特点。

缩颈可用断面收缩率 φ 来表示，若拉伸试样截面积为 A_0，拉断后的最小截面积为 A，拉伸后均匀变形部分的截面积为 A_g，则

超塑性材料：$A \approx A_g < A_0$，$\varphi \approx 100\%$；

一般塑性材料：$A \ll A_g < A_0$，$\varphi < 60\%$；

脆性材料：$A \approx A_g \approx A_0$，$\varphi \approx 0$。

③ 小应力。超塑性材料在变形过程中具有黏性或半黏性流动的特点，变形抗力很小。通常用流动应力来表示变形抗力的大小。在最佳变形条件下，流动应力要比常规变形时小到几分之一乃至几十分之一。如Zn-22%Al的最大流动应力仅为2.0 MPa左右，Ti-6Al-4V也仅为1.5 MPa，GCr15钢为30 MPa左右。

④ 易成形。由于超塑性具有以上特点，而且变形过程基本上没有或只有很小的应变硬化现象。所以超塑合金易于压力加工，流动性和填充性极好，可进行体积成形、板料与管料的气压成形、无模拉拔等多种方式成形，而且产品质量可大大提高。钛板的超塑性成形正是利用这些特点，可成形出弯曲半径小到材料厚度的零件，若采用冷成形或普通热成形是无法实现的。

2) 微观特征。从金相组织方面观察，当原始材料为等轴晶粒组织时，在变形后几乎仍是等轴晶粒，看不到晶粒被拉长，但有一定程度的长大，带棱角的晶界变成弯曲或圆弧化。在Zn-22%Al合金中有些层状组织的富Al相由于变形而



球化。一般地说，晶粒内部没有发生应变，带状组织可能被消除或减轻。

（3）超塑性成形的特点

超塑成形具有以下优点。

1）材料塑性高。金属材料在超塑性状态下，可以承受大变形而不破坏。对于形状复杂的零件，可以实现一次成形而不需要预成形工序，因此可以减少工时，缩短生产周期，为难变形材料的塑性加工开辟了良好的途径。在航空航天工业中，对难加工的钛合金、镁合金零件，采用超塑成形，更能显示其优越性。

2）变形抗力小。超塑变形时，进入稳定阶段后，不存在或很少有应变硬化，金属的变形抗力小，例如：Zn-22%Al合金在250℃下的流动应力只有2 MPa左右；Ti-6Al-4V合金在950℃时的流动应力为10 MPa左右；GCr15钢在700℃时的流动应力为30 MPa。比一般变形时的应力小得多。因此超塑成形时所需设备吨位也小，甚至只用气压即可成形。一般超塑模锻所需设备吨位约为常规模锻设备吨位的1/5～1/10，并可大大节省能源。

3）可以一次精密成形。超塑成形时，不但金属变形抗力小，而且流动性和充型性好。在恒温保压状态下，有蠕变机理作用，可以充满模具型腔尖角部位，获得轮廓清晰的零件，并且可以一次成形出形状复杂的零件。

4）模具寿命长。由于超塑成形时的载荷低、速度慢、不受冲击，故模具寿命长。可以采用低强度价廉的材料来制作模具，模具也不需进行热处理。但由于零件的材料不同，成形温度不一，对高温成形者，应用相应的耐高温的材料来制作模具。

5）成形零件质量好。超塑成形的零件不存在由于硬化引起的回弹导致的零件成形后的变形问题，故零件尺寸稳定，对钛合金等零件更能显示其优点。

当然，超塑成形目前也还存在一些缺点和问题，如生产率低、超塑变形过程出现空洞化而影响零件使用性能等。

1.2 超塑性机理及变形的影响因素

（1）超塑性机理与力学特性

1）超塑性机理。超塑性变形不同于一般金属的塑性变形，后者的变形主要发生在晶粒内部，如滑移、孪晶等，其原子的相对移动量不超过两个原子的间距，因而伸长率不大。而超塑变形主要是一种晶界行为，即以晶粒转动、晶界滑动、晶粒换位以及空位扩散蠕变、位错蠕变的综合作用为主。有的超塑合金晶界滑动的应变量与总应变量之比可高达50%～70%。

超塑性变形机理主要有以下几种观点。

① 空位迁移——扩散蠕变机理。空位迁移指原子的迁移或原子的扩散，它已被用于解释蠕变变形。由于超塑性变形与蠕变变形有很多相似之处，因此认为在低应力下所引起的空位扩散同样可解释超塑变形机理。

② 晶界滑移机理。基于超塑性变形中晶粒形状和大小都没有显著变化的特点，认为晶界好似晶体间的流动层参与变形，晶粒则发生移动和转动，晶粒越小越接近于完全无序的或非晶的流动状态。

③ 位错运动机理。认为沿晶粒间的边界滑移受到晶界上突出物阻碍时，会产生局部应力集中，当应力超过一定值时就会产生位错的松驰应力，使晶界继续滑移。这些位错在穿过晶粒堆积到对面晶界前，直至堆积位错群的反应力阻止位移错再发生，晶界滑移方停止。堆积群前面的位错可通过攀移到达晶界，并沿晶界运动直至消失，然后集中区域又产生新位错以补充缺位，使晶界滑移继续进行。这种错位的滑移、攀移和消失造成了超塑性变形。

2）力学特性。在等温下变形，并且不考虑变形过程晶粒度变化因素，结构超塑性的流动方程仅包括应力、应变和应变速率等因素，其形式为

$$\sigma = K\varepsilon^n\dot{\varepsilon}^m$$

式中，σ为真实应力；ε为真实应变；$\dot{\varepsilon}$为真实应变速率；n应变强化指数；m为应变速率敏感性指数（亦称应变速率强化指数）；K为与温度等有关的材料常数。

当变形温度<$0.3T_m$时（T_m为熔点的热力学温度），以应变硬化影响为主，应变速率敏感性影响很小，这时可认为$m\approx0$，则方程变为：

$$\sigma = K\varepsilon^n$$

在超塑性变形温度下（温度>$0.5T_m$），应变硬化不再显著，材料呈现相当范围的均匀变形。此时，存在着恢复与硬化的平衡状态，亦即n的影响将逐渐消失，如果认为$n\approx0$，则方程变为：

$$\sigma = K\varepsilon^m$$

此即Backofen等提出的流变方程，近似地认为K和m为常数。

绝大多数金属的总伸长率δ值随m值增大而增大。故一般表示超塑性指标，除δ外，可用m值表示，具有超塑性的m值为：$0.3\leqslant m<1$。

影响金属超塑性成形的主要因素有超塑性变形温度（T_{sp}）、应变速率（$\dot{\varepsilon}$）及材料晶粒度。此外，应变硬化指数、晶粒形状因素、材料内应力以及表面应力等亦有一定影响。

（2）变形温度的影响

超塑性变形与许多热激活过程有关，因此，温度是超塑性变形的一个很重要的影响因素。一般要求温度$T\geqslant0.5T_m$。许多材料在（0.4～0.85）T_m范围内呈现超塑性，只是程度有所不同。图7.4-1为变形温度对流动应力及m值之影响示意图。图7.4-2为Zn-22%Al的变形温度对σ、m和伸长率δ的影响关系。

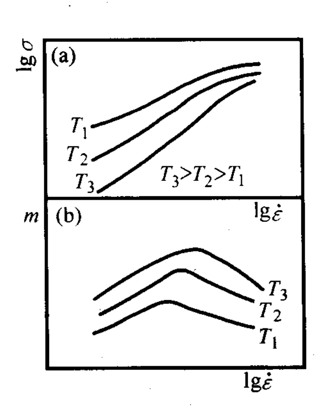


图7.4-1 温度对σ-$\dot{\varepsilon}$和m-$\dot{\varepsilon}$曲线影响示意图

由图7.4-1、图7.4-2可以看出，当其他条件不变时，在低于某一个临界温度T_2的一定温度范围内，提高变形温度一般会发生下面的一些影响。

1）流变应力降低，这种效应在低应变速率区更明显。

2）超塑性变形区变宽，且向应变速率增加的方向移动。

3）应变速率敏感性指数m的峰值增加，且与此峰值对应的应变速率也增加。

4）伸长率提高。

高于温度T_2时，再提高变形温度，就会起相反的效果（如图7.4-2）。



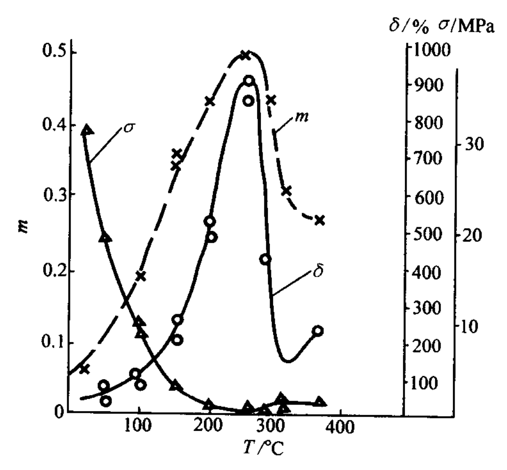


图 7.4-2 Zn-22%Al 合金的 σ、m、δ 值与温度的关系

图 7.4-3 为 Ti-6Al-4V 变形温度对 σ、δ 和晶粒直径影响关系。图 7.4-4 为 Ti-6Al-4V 的变形温度和时间对晶粒长大的影响关系。

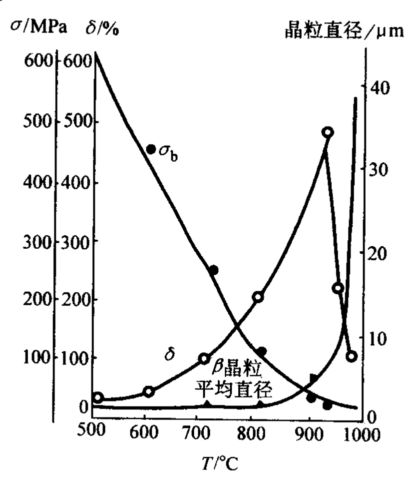


图 7.4-3 Ti-6Al-4V 变形温度对 σ、δ 和晶粒直径影响关系

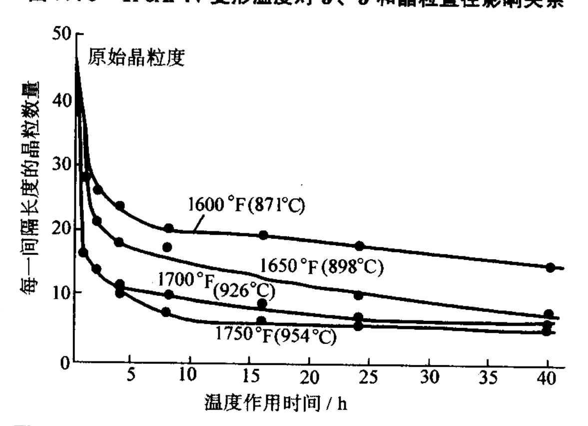


图 7.4-4 Ti-6Al-4V 的变形温度和时间对晶粒长大的影响关系

(3) 应变速率的影响

应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 是影响金属超塑性变形的又一重要因素，图 7.4-5 为 $\dot{\varepsilon}$ 对 σ、m 值的影响。

图 7.4-5 表明，在一定温度下，随应变速率变化，m 值有一个最大的峰值。在 "S" 形曲线的超塑性变形Ⅱ区内，变形是以晶界滑移为主，这种晶界滑移即受空位扩散机制的调节，又受位错蠕变运动的调节；随着 $\dot{\varepsilon}$ 减小曲线降到Ⅰ区内，则空位扩散机制的作用增加，即进入蠕变为主的变形区；随着 $\dot{\varepsilon}$ 的提高而进入Ⅲ内，这时位错蠕变运动机制作用增强，而进入普通塑性变形区。

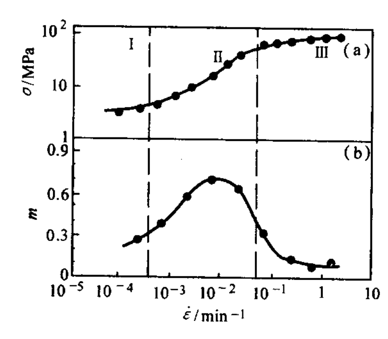


图 7.4-5 应变速率对 σ、m 的影响

图 7.4-6 为 Zn-22Al 的 $\dot{\varepsilon}$ 对 m 的影响，图 7.4-7 为 Ti-6Al-4V 的 $\dot{\varepsilon}$ 与 σ 值的关系。

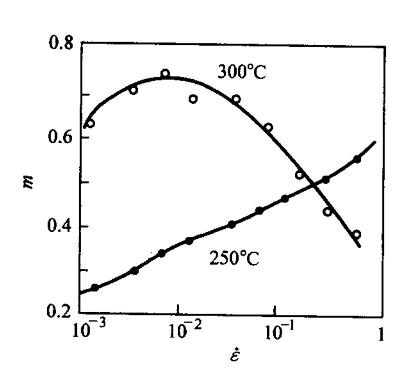


图 7.4-6 Zn-22Al 的 $\dot{\varepsilon}$ 与 m 的关系

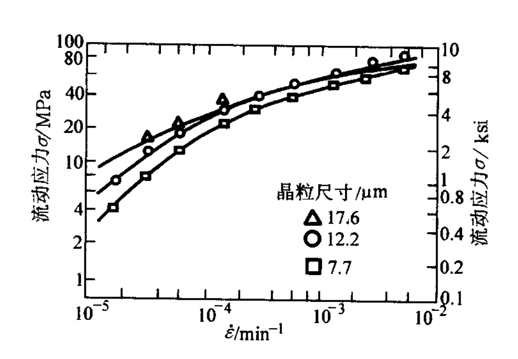


图 7.4-7 Ti-6Al-4V 的 $\dot{\varepsilon}$ 与 σ 的关系

几种典型超塑性合金的应力-应变速率关系曲线，见图 7.4-8。

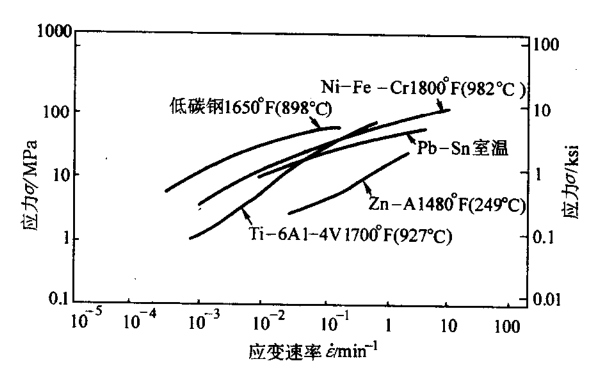


图 7.4-8 几种典型超塑性合金的应力-应变速率关系曲线

(4) 晶粒尺寸及形状的影响

金属的组织特征是影响金属超塑性变形的内在条件，起

始的晶粒大小及晶粒形态等组织特征，对超塑性变形十分敏感。为了获得良好的超塑性，一般要求晶粒尺寸 $d<10\ \mu m$，最好 $d\approx 1\sim 1.5\ \mu m$。不同晶粒尺寸与 σ-$\dot{\varepsilon}$ 和 m-$\dot{\varepsilon}$ 的关系曲线见图 7.4-9。

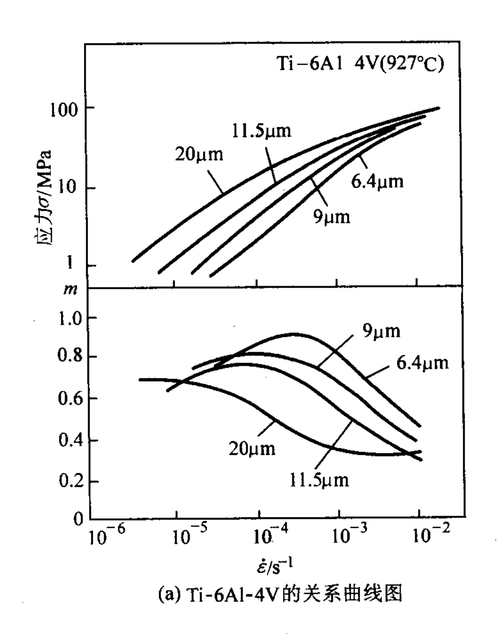
图 7.4-9 表明，减少晶粒尺寸，在一定范围内，会产生下面几种影响。

1) 流变应力下降，这一效应在Ⅰ、Ⅱ区比较明显，在Ⅲ区不明显。

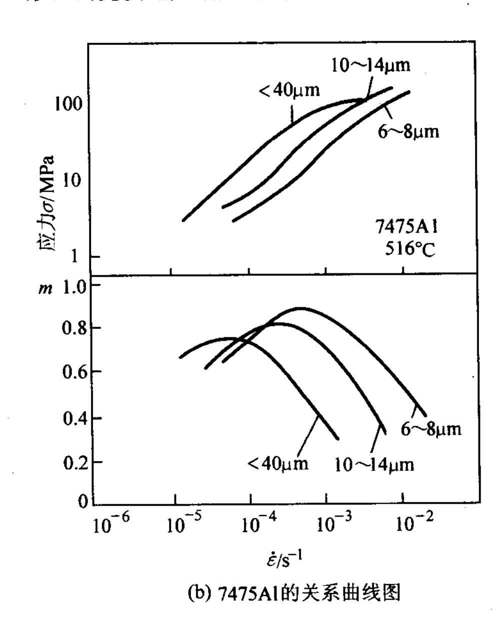
2) 超塑性变形区（Ⅱ区）变宽，且向应变速率增加的方向移动。

3) 应变速率敏感性指数 m 的峰值增加，且与此峰值对应的应变速率向高应变速率方向移动。

从上面三点可以看出，减小晶粒度与提高变形温度有相似的影响，但晶粒度的减小也有一个限度。实验表明，超过这个限度，m 的峰值不但不增加，反而下降，但超塑性变形区的宽度还是增加的（见图 7.4-10，7.4-11）。



(a) Ti-6Al-4V的关系曲线图



(b) 7475Al的关系曲线图

图 7.4-9 几种晶粒尺寸的 σ-$\dot{\varepsilon}$ 和 m-$\dot{\varepsilon}$ 的关系曲线

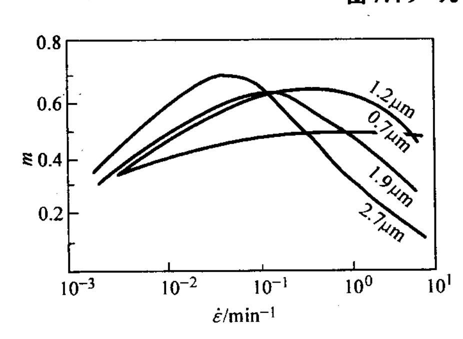


图 7.4-10 几种晶粒尺寸的 Zn22%Al 合金的 m-$\dot{\varepsilon}$ 关系曲线

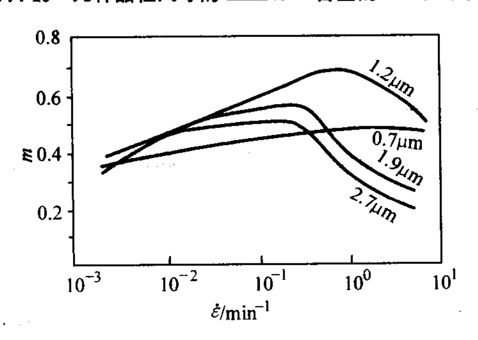


图 7.4-11 几种晶粒尺寸的 Zn-22%Al-0.84Cu 合金的 m-$\dot{\varepsilon}$ 关系曲线

至于晶粒的形状，则要求呈等轴状。如以 d_L 表示晶粒平均纵向尺寸，d_T 表示晶粒平均横向尺寸，最好是 $d_L/d_T\approx 1$，一般不要超过 1.3～1.4，d_L/d_T 的增大与晶粒增大有相似的影响。

1.3 超塑性金属和合金

目前研究较多、应用较广的是以细晶超塑性为主的超塑性金属材料。几种主要的超塑性合金包括：

1) 锌铝合金。典型代表为 Zn-22% Al，伸长率 $\delta>$ 1 500%，超塑性温度 $T_{sp}=250\sim 275$℃。由于锌铝合金强度不高，其应用有限。

2) 铝合金。铝合金已作为实用材料加以研究。在高强铝合金中目前研究最多的是美国的 7000 系列，其典型代表为 7475 合金，成分为：Zn5.2%～6.2%，Mg1.9%～2.6%，Cu1.2%～1.9%，Fe≤0.12%，Si≤0.10%，Mn≤0.06%，Cr0.18%～0.25%，Ti≤0.06%，铝基。$T_{sp}=516$℃，$\delta>$ 500%。

3) 钛合金。钛合金为航空和宇航工业中的重要结构材料，典型代表为 Ti-6Al-4V（TC_4），其超塑性比较好，$\delta>$ 1 000%，$T_{sp}=927$℃。

表 7.4-2 给出某些恒温超塑性材料及其超塑性温度范围、m 值和伸长率 δ。

表 7.4-2 恒温超塑性材料及其特性

超塑性材料	最大 m 值	最大伸长率/%	超塑性温度/℃
Zn-Al 共析合金	0.45～0.6	1 000～2 500	200～300
Zn-22%Al-4%Cu	0.5	1 000	200～250



续表 7.4-2

超塑性材料	最大 *m* 值	最大伸长率/%	超塑性温度/℃
Zn-22%Al-0.2%Mn	0.5	约 1 000	200～250
Zn-Al 共晶（Zn-5%Al）	0.5	300	200～360
Zn-40%Al	0.48	700	250
Zn-0.2%Al	0.81	465	23
Zn（商用）		400	20～70
Al-33%Cu-7%Mg	0.72	＞600	420～480
Al-11.7%Si	0.28	480	450～550
Al-5.6%Zn-1.56%Mg-0.41%Zr	0.70	500	530
Al-10.72%Zn-0.93%Mg-0.42%Zr	0.90	1 550	550
Al-6%Cu-0.5%Zr		＞1 000	390～500
Al-12%Cu-4%Si	0.4	100	500
Al-14.1%Cu-4.7%Ni	0.35	520	450～550
Al-25.2%Cu-5.2%Si	0.43	1 310	500
7075Al		＞200	405
7475Al		1 200	516
Al（商用）	0.2	6 000（扭转）	377～577
Cu-9.8%Al	0.7	700	700
Cu-10%Al-3%Fe	0.6	720	800
Cu-38.5%Zn-3%Fe	0.53	330	500～800
Cu-40%Zn	0.64	515	600
Ti-8%Mn-0.14%O_2	约 1.0	150	900
Ti-5%Al-2.5%Sn	0.72	450	900～1 100
Ti-6%Al-4%V	0.85	1 000	800～1 000
Mg-Al 共晶（Mg-33%Al）	0.85	2 100	350～400
Mg-6%Zn-0.5%Zr	0.6	225	450
Fe-0.1%C	0.55	120	860
Fe-0.8%C		210～250	708～713
Fe-1.0%C	0.35	190	700～715
Fe-0.3%C-1%Cr-1%Mn-1%Si		420	770
Fe-4%Ni	0.58	820	900
Fe-0.91%C-0.45%Mn	0.42	133	716
低合金钢	0.65	400	800～900
轴承钢 Fe-1.0%C-1.5%Cr	0.42	543	700
超高碳钢 Fe-1.37%C-1.04%Mn-0.12%V		817	650
IN744，Fe-6.5%Ni-26%Cr	0.5	600	925
Ni-26.2%Fe-34.9%Cr-0.58%Ti	0.5	＞1 000	795～855
Sn-5%Bi	0.72	约 1 000	20
Sn-2%Pb	0.5	600	20
Sn-Bi 共晶		1 950	20～30
Pb-Cd 共晶	0.35	800	100
Pb-39%Sn 共晶	0.4～0.7	1 500～2 000	25～170
Cd-27%Zn	0.5	350	20～30

注：表中所有成分均为质量分数。

2　薄板的超塑性成形工艺

2.1　超塑性成形方法

薄板的超塑性成形方法大致可分为三种：①真空成形；②气压成形（吹塑成形）；③模压成形（偶合模成形）。前两种方法是塑料（或玻璃）制品成形时常用的方法。

（1）真空成形

在模具腔内抽真空，使处于超塑性状态下的板坯与模具吸贴成所需形状的零件。真空成形法由于成形压力小于 0.1 MPa，不适于成形坯料厚、形状复杂、曲率变化大的零件。真空成形法包括凸模法与凹模法。

1）凸模法。将模具型腔内部抽真空，使加热到超塑性成形温度的坯料，被吸附在具有零件内形的凸模上（见图 7.4-12）。该方法适于制作内形尺寸和形状要求精确的简单零件。

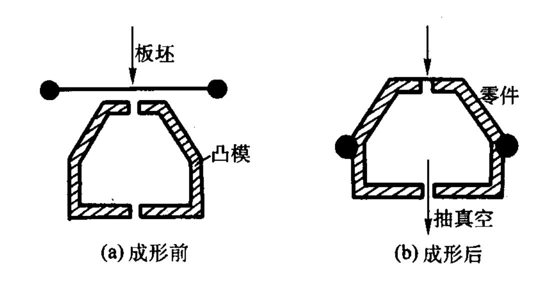


图 7.4-12　凸模法

2）凹模法。将模具型腔内部抽真空，坯料经加热到超塑性成形温度后，即被吸附在具有零件外形的凹模上（见图 7.4-13）。该方法适于制作外部尺寸和形状要求精确的简单零件。

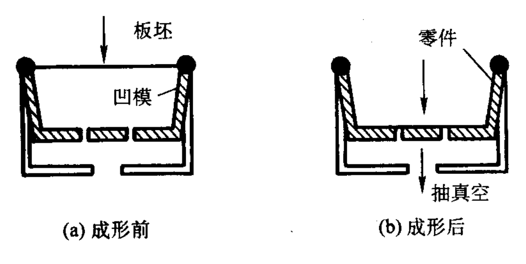


图 7.4-13　凹模法

一般凸模法用于较深容器的成形，凹模法用于较浅容器的成形。

（2）气压成形（吹塑成形）

气压成形是一种特殊的胀形工艺。传统的胀形工艺是用机械、液压胀形或用爆炸胀形的方法实现的，使用的压力与能量都比较高，并且由于材料塑性的限制，变形量一般都不很大。吹塑成形则是一种用于低能、低压就可获得大变形量的成形，是一种与传统工艺概念不同的板料成形技术。由于金属在变形过程中是自由的，因此，几乎全部动力都消耗在变形功上，摩擦损失很小（对于自由吹塑来说，则没有摩擦损失），这与其他冲压成形有着本质的区别。

气压成形是目前研究最多、应用最广泛的一种超塑性成形方法。主要用于 Zn-22% Al、Zn-5% Al、Al-6% Cu-0.5% Zr 和钛合金的超塑成形，板料厚度为 0.4～4 mm，气体压力一般为 0.3～0.5 MPa。对于厚度较大的板料和形状特别复杂的零件一般也不超过 2 MPa。

1）气压成形法的分类。气压成形法的分类和特点见表 7.4-3。

表 7.4-3　气压成形法分类及特点

方法	特　点	应　用	示　意　图
自由吹塑成形	1）不用模具或只用压边圈 2）坯料受气压作用自由延展胀形	实用应用的较少	
凸模吹塑成形	1）成形前坯料外侧形成封闭的充压腔 2）坯料受气压作用逐渐与凸模型面贴合 3）零件内表面尺寸精度高、形状准确，相对深度较大，模具较易加工 4）坯料较大，脱模较难 5）成形件底部较四周厚	常用于制作内形要求准确，深宽比大于 0.6 的零件	
凹模吹塑成形	1）成形前坯料内侧形成封闭的充压腔 2）坯料受气压作用逐渐与凹模型面结合 3）零件外表面尺寸精度高、形状准确，坯料节省，脱模较易 4）零件相对深度较小，模具加工较难 5）成形件底部较四周薄	常用于制作外形要求准确，相对深度不大于 0.4 的零件	
复合成形	凸、凹模吹塑成形的结合	适于制造形状复杂的零件，是最具有实际应用价值的一种方法	



2）气压成形过程。通常板料在模具中的气压成形过程可分为三个阶段，现以成形典型的筒形件来进行分析（如图7.4-14所示）。

① 自由成形阶段（自由胀形）：板料在气体压力作用下向一方鼓起，此时与模具边壁和底部均无接触（见图7.4-14a），圆顶的相对高度 H（$H=H_i/R_0$）从零（$H_i=0$，板料未变形）开始，逐渐增到最大值 $H=1$（$H_i=R_0$），这时对应着半球形成。

② 初成形阶段（筒壁形成）：随着变形继续发展，凸面加高，板料开始与模具的一部分接触，与模具接触的部分材料停止变形，未接触部分则继续变形，使得同模具接触的部分进一步扩大（见图7.4-14b）圆顶部分为厚度继续减薄的半球，直至半球顶点与凹模底部接触为止。

③ 最后成形阶段（零件制成）：所有与模具接触的部分均停止变形，板料继续充填模具较小的圆角等部位，最后与模具完全贴合（见图7.4-14c），侧壁与底部交接处圆角半径从开始的 $r=R_0$ 减小到最后值 $r=r_{终}$。

由图7.4-14可见，当 $H<1$ 时，不出现成形过程的第二阶段。

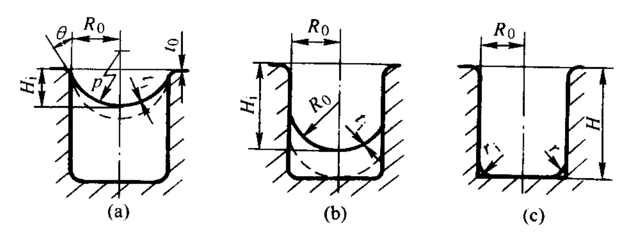


图 7.4-14　超塑性气压成形的三个阶段

图7.4-15为筒形件超塑性气压成形过程中的压力变化。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ对应于图7.4-15的三个阶段。在成形的三个阶段中，自由成形可用较小的压力慢速变形，使变形过程尽量均匀稳定，以便得到均匀的壁厚。初成形阶段可利用已给压力使零件继续变形，而最后成形阶段因零件成形已接近完成，材料的变形量不大，因此往往用足够大的压力去填充模具的小圆角、加强筋、沟槽等部位，以使零件完全贴模。

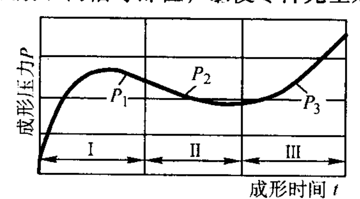


图 7.4-15　筒形件超塑性气压成形过程中的压力变化

3）超塑气压成形的典型工艺流程

① Ti-6Al-4V钛合金典型构件的工艺流程见图7.4-16。

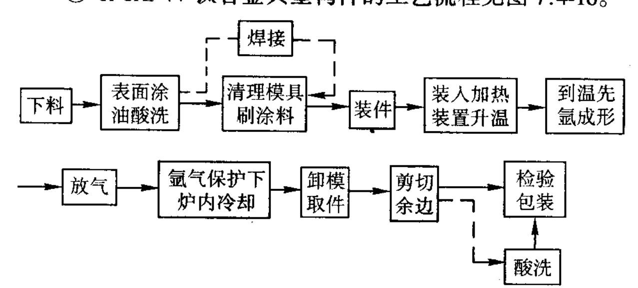


图 7.4-16　Ti-6Al-4V钛合金典型构件的工艺流程

② 7475Al构件典型的工艺流程见图7.4-17。

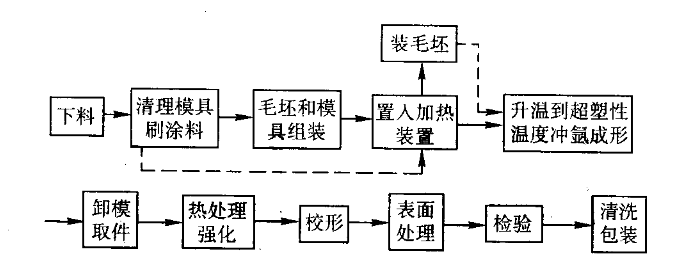


图 7.4-17　7475Al构件典型的工艺流程

（3）模压成形（偶合模成形）

又称偶合模成形法、对模成形法。与传统的偶合模成形法的区别是，坯料处于超塑性状态，对制作薄板零件往往会由于模具结构要求特殊，费用昂贵，故一般只适用于进行等温挤压成形零件。

图7.4-18为用于铬镍钛钢杯形件高温拉深的模具。该模具由下列部分组成：钢壳体1；凹模2和压板3（均由耐热合金制成，凹模洞口4内部强迫冷却）；加热电阻丝5；高强度陶瓷6；普通陶瓷7及强迫冷却的凸模8。坯料直径为230 mm，厚为1.2 mm。为了获得细晶组织，坯料以30～50℃/s速度在盐浴炉中加热到780℃，然后水淬。超塑性拉深时由于材料没有硬化效应，塑性提高，从而大大提高了金属深拉深的能力。又由于凸模与凹模口的冷却，降低了坯料中心部分与筒壁的温度，提高了拉深件“危险”截面区的强度。拉深工序一次完成，设备用1 000 kN液压机，相应的变形速度为 $10^{-2}\sim10^{-1}$/s，拉深的全过程需4～5 min，制作的壁厚分布更趋均匀。

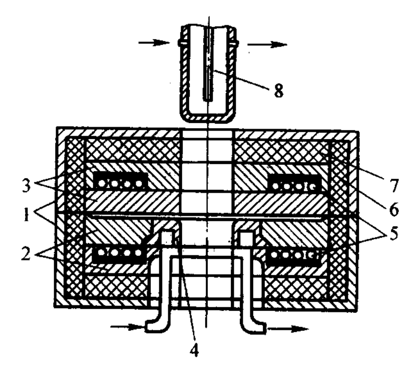


图 7.4-18　高温拉深模具

在常规拉深中，单次拉深的最大杯深 H 和杯的直径 D 之比约为0.75左右，而采用超塑性拉深时，H/D 可达到11以上。

2.2　超塑性成形的工艺参数

超塑性成形工艺参数主要包括成形温度、应变速率、成形压力和保压时间等。

（1）成形温度

最佳成形温度可根据同一材料在不同温度下的几条S形曲线，通过综合考虑 m 值、应变速率和氧化、吸氢程度等因素来确定。常用的几种超塑性合金成形温度范围见表7.4-4。

表 7.4-4 超塑性成形温度

超塑性合金	成形温度范围/℃	超塑性合金	成形温度范围/℃
Ti-6Al-4V	900 ~ 930	Supral 150	350 ~ 475
Ti-5Al-2.5Sn	900 ~ 1 100	LY-12	400 ~ 435
7475Al	500 ~ 516	铝—锂合金	520 ~ 530
7075Al	500 ~ 510	Zn-22% Al	250 ~ 275

(2) 成形压力和时间

成形压力和成形时间是两个互为关联的可变工艺参数。压力大则成形时间短，压力小则成形时间长。为保证材料在最佳应变速率（即 m 值最大处的应变速率）下成形，通常在加载过程中，要对压力及时间进行动态控制。一般控制的方式有两种：一种是按最佳压力 – 时间曲线（此曲线使应变速率保持在最佳值），以连续的加载方式，进行这种控制；另一种是沿最佳压力 – 时间曲线，按折线以分段加载的方式进行这种控制。图 7.4-19 为钛合金半球在不同压力下，成形高度与保压时间的关系。

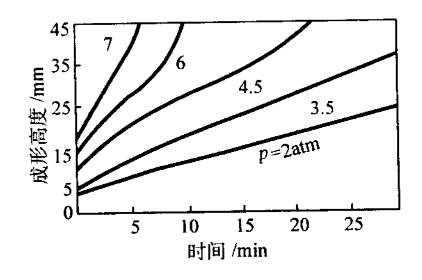


图 7.4-19 半球形件在不同压力下成形高度与时间的关系曲线

圆锥杯形件成形过程中的压力 – 时间曲线方程和各阶段成形时间的估算公式见表 7.4-5。

表 7.4-5 圆锥杯形件各阶段变形模式、最佳压力 – 时间曲线方程及成形时间

	第一阶段	第二阶段	第三阶段
变形模式	球壳自由胀形 (第一阶段结束时的状态)	球壳在圆锥内胀形 (第二阶段结束时的状态)	局部环壳胀形 (第三阶段变形的过程)
最佳压力时间曲线方程	$p=\frac{4s_0K\dot{\varepsilon}_e^m}{a}\left(\frac{e^{\dot{\varepsilon}_e^t}-1}{e^{-2\dot{\varepsilon}_e^t}}\right)$ 式中 p—压力（MPa） t—时间（min） $\dot{\varepsilon}_e$—最佳等效变速率（min^{-1}） K、m—材料参数	$p=\frac{s_0(1+\sin\theta)\cos\theta K\dot{\varepsilon}_e^m}{a}\times\exp\left[\left(\frac{1}{\eta}-1\right)\dot{\varepsilon}_e t\right]$ 式中 $\eta=\csc\theta-1$	参数方程 $\cot\psi=r_2\leqslant r\leqslant r_3\approx r_m$ $p=\frac{2\sqrt{2}s_2K\varepsilon_e^m}{r}\left(\frac{r}{r_2}\right)^{\alpha}\left(\frac{u_1r_2+u_0}{u_1r+u_0}\right)^{\alpha-u_2}\times\{1+[f(r)]^2+[1+f(r)]^2\}^{-1/2}$ $t=-\frac{1}{\dot{\varepsilon}_e^m}\ln\left[\left(\frac{r}{r_2}\right)^{(1+ur_2)\alpha}\left(\frac{u_1r_2+u_0}{u_1r+u_0}\right)^{v}e^{\omega(r_2-r)u_2}\right]$ 式中 $s_2=\frac{s_0}{2}\left(\frac{c}{a}\right)^{\eta}(1+\sin\theta)^{\eta-1}$ $u=\frac{4\cos^2\psi-(\pi-2\psi)^2}{\sin2\psi-(\pi-2\psi)}C$ $\omega=0.155/(r_2-r_m)$ $u_0=(\pi-2\psi)c$ $f(r)=\frac{c-r\cot\psi}{c+r(\cos\psi-\cot\psi)}$ $u_1=2\cos^2\psi-(\pi-2\psi)\cot\psi$ $\upsilon=(1+ur_2)(\alpha-u_2)+\omega u/u_1$ $u_2=\frac{\pi-2\psi-2\cot\psi}{\sin2\psi-(\pi-2\psi)}-1$
成形时间	$t_1=\frac{1}{\dot{\varepsilon}_e}\ln\left(\frac{2}{1+\sin\theta}\right)$	$t_2=\frac{\eta}{\dot{\varepsilon}_e}\ln\left[\frac{a}{c(1+\sin\theta)}\right]$	$t_3=-\frac{1}{\dot{\varepsilon}_e}\ln\left[\left(\frac{r_m}{r_2}\right)^{(1+ur_2)\alpha}\left(\frac{u_1r_2+u_0}{u_1r_m+u_0}\right)^{\upsilon}e^{\omega_1(r_2-r_m)u_2}\right]$

成形压力与零件的尺寸、形状及材料在超塑性温度下的强度密切相关，一般推荐的范围是压力为 0.5 ~ 2 MPa，时间为 10 ~ 60 min。表 7.4-6 给出了 Ti-6Al-4V 板料成形实例。

(3) 应变速率



表 7.4-6　Ti-6Al-4V 超塑性成形压力试验数据表

零件形状	零件尺寸 /mm	板料厚度 /mm	成形温度 /℃	单位成形压力/MPa
球形	ϕ100	1	925	~0.5
圆筒形	ϕ100	1	900~925	<0.6
圆筒形	ϕ25	0.6	900~925	<0.8
盒形	100×150	1.2	900	<0.8

应变速率应在 S 形曲线上最大斜率（即 m 值）所对应的 $\dot{\varepsilon}$ 点附近选取。Ti-6Al-4V 的应变速率一般推荐范围为 $10^{-4}\sim10^{-3}$ (s^{-1})。

2.3　超塑性成形的结构工艺性

(1) 零件的壁厚计算

超塑成形零件壁厚必然要变薄，并且不均匀。图 7.4-20 和图 7.4-21 为利用凸、凹模超塑性成形后壁厚变化的示意图。

壁厚的变化按下式计算

$$t = t_0 e^{-(\varepsilon_x - \varepsilon_y)} \tag{7.4-1}$$

式中，t_0 为板料厚度；ε_x、ε_y 分别为板内的正交方向实际应变。

(2) 结构设计参数

若有关结构参数设计不合理，会造成局部变薄过大，导致零件壁厚不均匀性更加严重。表 7.4-7 列出 Al-Cu-Zr（Supral）系列合金零件的合理设计参数。

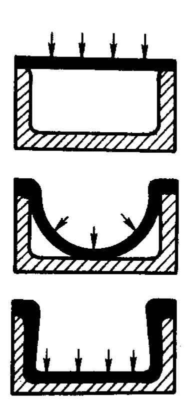


图 7.4-20　凹模法壁厚变化示意图

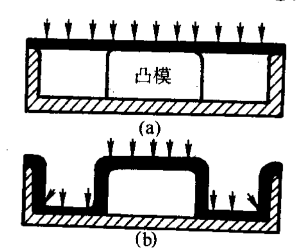


图 7.4-21　凸模法壁厚变化示意图

表 7.4-7　结构参数设计

零件设计参数	凸模成形法	凹模成形法
零件最大平面尺寸	900 mm×600 mm	2 400 mm×1 200 mm
板材厚度规格/mm	0.8，1.0，1.2，1.6，2.0，2.5，3.0，4.0	
极限深宽比	$2h/(W+L)>0.6$ h　W　L	$2h/(W+L)>0.4$ h　W　L
脱模斜角	≥2°	≥3°
公差 [铸造模具公差为±0.5%，铸造后再机械加工时，铸造公差可放宽]	公差在零件内侧，即与模具型面接触的一侧	公差在零件外侧，即与模具型面接触的一侧
$R_1\sim R_5$—最小圆角半径 $t_p=\dfrac{tF_t}{F_b}$—平均厚度 t—板厚 F_t—零件平面面积 F_b—零件表面积	R_1　R_3　R_2　R_2　R_3 毛坯压料面 $R_1 \nless 5t$　$R_2 \nless 5t_p$　$R_3 \nless 3t_p$ 当高宽比接近0.6时，R_3要加大	R_1 毛坯压料面 R_4　R_3　R_2　R_3 $R_1 \nless 15t$　$R_2 \nless 5t_p$　$R_3 \nless 5t_p$　$R_4 \nless 5t_p$

续表 7.4-7

零件设计参数	凸模成形法	凹模成形法
凸埂与凹槽最小尺寸（凸、凹模上相同）	$R_1 \not< 3t_p$　$R_2 \not< 5t_p$　$R_3 \not> 0.7$ 两梗之间距离应与凹模成形的极限高宽比一致；凸梗长度 $L \geqslant 2h$	$W \not< 5t_p$　$h/W \not> 0.4$　$R \not< 3t_p$ 凹槽长度 $L \geqslant 2h$
圆凸包与圆凹坑的最小尺寸（凸、凹模上相同）	$D \not< 10t_p$　$R_1 \not< 3t_p$　$R_2 \not< 5t_p$　$h/D \not> 0.5$	$D \not< 10t_p$　$R_1 \not< 3t_p$　$R_2 \not< 5t_p$　$h/D \not> 0.3$

(3) 夹层壁板类构件的结构工艺性

三层的夹层壁板类构件，外蒙皮易出现沟槽等缺陷，应合理设计板厚搭配关系，外蒙皮可整体加厚或局部加厚（如图 7.4-22），厚度计算公式为

$$t_1 = 3.5t_2 \tag{7.4-2}$$

式中，t_1 为外蒙皮厚度；t_2 为夹心板厚度。

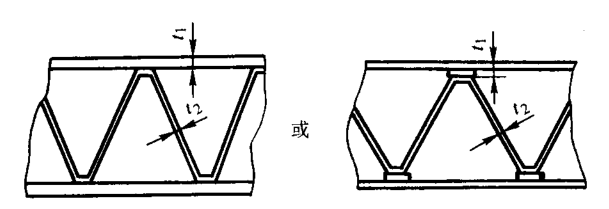


图 7.4-22　板厚搭配关系

2.4　零件壁厚不均匀的控制方法

在薄板超塑成形中对零件壁厚的控制是一个很关键的问题，因为气压成形中金属的流动类似于普通杯突件的拉伸，它是一个延展的过程，径向与切向的伸长变形必然引起厚向的压缩变形。在变形过程中，材料得不到外部的补充，而是靠板料表面积的局部扩展与厚度变薄得到所需的形状，零件壁厚变薄是必然的。

壁厚变薄不均匀，则是由于在变形过程中零件各处形状不同，变形程度也不相同而引起的。当板料扩展到同模具内壁接触时，就限制了这部分的变薄，继续延展就集中在其余未与模壁接触的材料上。因此，最后成形的部位的壁厚是最薄的。

图 7.4-23 所示为在不同的高度/直径比值下，圆筒零件利用凹模超塑性成形后的壁厚变化情况。

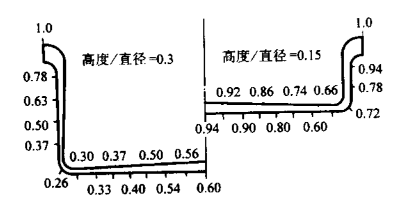


图 7.4-23　壁厚变化情况

控制零件壁厚变薄不均匀的途径有：控制变形速度分布；控制温度分布与控制摩擦力等。

1) 预反向成形法。图 7.4-24 为预反向成形示意图。先预反向胀形（如图 7.4-24a、7.4-24b），而后再正向胀形（如图 7.4-24c），最后成形为所需零件（如图 7.4-24d）。一般反胀形高度不大于零件高度的 10%。

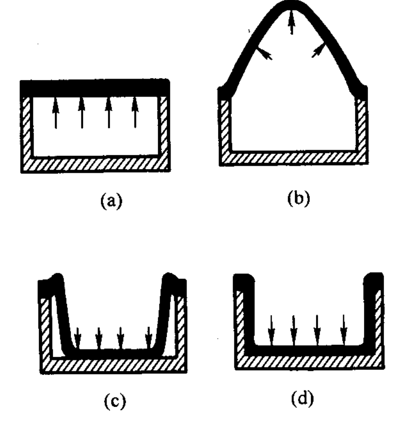


图 7.4-24　预反向成形法示意图

图 7.4-25 为使用凹面冲头（反向凹模的）方法；图 7.4-26 为使用凸面冲头（反向凸模）的预反向成形法。把板料放在模腔与辅助模腔之间并夹紧。辅助模腔内装有可移动的凹面冲头（凹模）或凸面冲头（凸模）。先通以反向气压，使板料预先向辅助模腔内变形，在凹模或凸模上形成一定的形状。凹模或凸模以一定的速度向下移动，由于板料逐渐贴靠在冲头上，引起摩擦，可阻止已接触部分继续变形。利用这种阻尼作用，使整个变形按预定的要求进行。然后再通以正向气压，使预成形件向模腔内变形，最后获得轮廓清晰、壁厚比较均匀的零件。利用这种方法可提高壁厚的均匀性 1.5～2.5 倍，并大大提高零件高度与直径之比。

2) 不均匀加热法。用不均匀的加热方法在板料上造成不同的温度场，变形困难部位的温度高于变形容易部位的温度，使前者的变形加快，后者的变形缓慢些，以达到零件壁厚均匀的目的。如半球类零件的周边部分往往壁厚大于顶部，顶部中心是壁厚最薄的部分。可对周边部分专门加热或使顶部降温，以获得壁厚分布均匀的零件，如图 7.4-27。



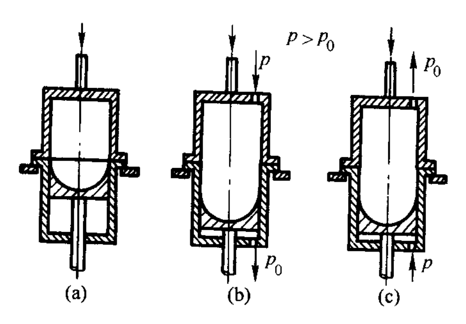


图 7.4-25　使用反向凹模的预反向成形

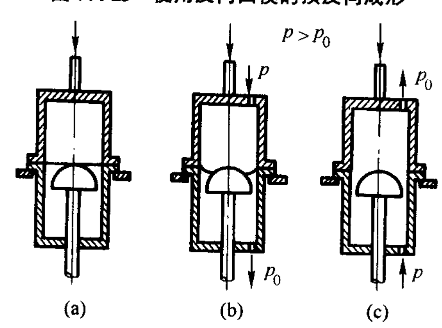


图 7.4-26　使用反向凸模的预反向成形

3）涂层控温法。在板料上预先涂一层易挥发的升华物质（如二氧化汞），在材料易变薄的部位涂得厚一些，不易变形的部位涂薄一些。这种涂料受热挥发后产生吸热反应，能造成不均匀的温度场，从而有利于零件壁厚均匀分布。

4）局部改变材料组织法。该方法是在超塑性条件下，利用了晶粒大小对合金成形性能有明显影响的特性。如对厚度为 1 mm 的 Ti-6Al-4V 材料中心区用喷灯进行加热处理，中

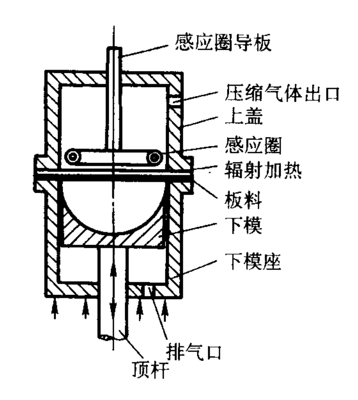


图 7.4-27　利用电感应的不均匀加热法

心的最高温度为 1 000～1 100℃，保持 10～15 s，其结果在材料上获得具有粗晶粒的局部区域，形成了组织不均匀。成形结果表明，在材料中心区 ϕ15 mm 范围内几乎没有什么变形，其厚度保持不变。

也可用螺旋感应加热器对板料加热，以建立不均匀组织区域，如图 7.4-28a 所示。由于采用了凸形螺旋形的感应器，感应圈到板料的距离不同，故得到不同的温度场。最大的粗大组织发生在板料的中心部位，该处正是超塑性成形时最易变薄处。图 7.4-28b 是未经热处理的板料与经过热处理而具有不均匀组织区域的板料在自由气压成形后测得的壁厚数据对比。板料原始厚度 t_0 = 2.5 mm，成形后测得的厚度为 t，图中所列数据为厚度变薄率（$t_0 - t$）/t_0。由图可知，板料未经处理时半球顶部变薄率为 88%，经热处理后的顶部变薄率减至 44%，厚度的均匀性提高了一倍，后者在各点上基本等厚。

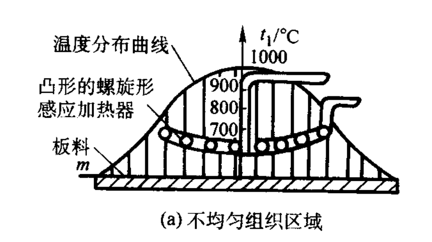


图 7.4-28　在圆形板料上建立不均匀组织区域的示意图（Ti-6Al-3Mo-1V）

5）板料预成形法。在非超塑性状态下（即通常所谓热成形法）制成预成形件，使随后的超塑性成形的变形量减小，从而使壁厚不均匀性也减小。

6）采用变厚度的板料。预先将板料轧成不同的厚度，使易变薄的部分厚些，从而使整个板料在变形结束时均匀变薄。

2.5　超塑性成形工艺过程

图 7.4-29 为 B-1 轰炸机发动机短舱的中央隔框（Ti-6A1-4V）超塑性成形工艺过程。

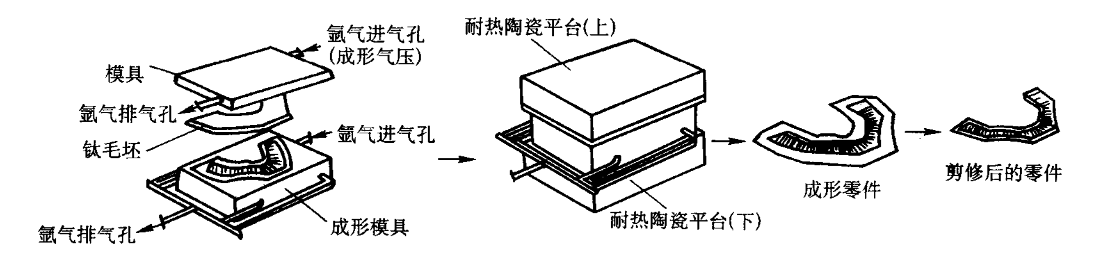


图 7.4-29　发动机短舱隔框超塑性成形工艺过程

超塑性成形零件是由 Ti-6A1-4V 板料成形的整体零件，具有完整的凸缘，带刚纹的腹板，弯曲半径与板厚相当，由于腹板带刚纹，最薄处板厚仅有 0.41 mm。

钛板坯料放置在模具之间，然后将模具放入上、下陶瓷加热平台中间，压住模具进行加热。与此同时，在进气管中充入氩气，既保护钛不受氧化，又对加热的钛板施加压力进

行成形，其成形速度必须很小。在成形模上有抽真空的管道，将空气抽尽防止氧化，又便于成形。成形后先断电冷却，然后切断气源和抽真空源，再取出零件，修边后，即成最后的零件。

3 超塑性成形模具

铝基合金等的超塑性温度较低，所用的模具材料一般不难解决。而钛和某些合金钢的超塑性温度高，因此，超塑性成形是在高温下进行的，其模具结构、选用材料以及型面几何尺寸计算等均与冷成形有所不同。

3.1 模具材料

（1）对模具材料的要求

对在高温下工作的模具材料的性能要求如下：

1）良好的抗高温氧化性能。金属材料在高温下如无特殊保护，都会氧化。要求模具表面能形成致密的氧化膜，以保护内部金属不再继续受到氧化。

2）良好的抗高温生长性能。一般金属在高温下膨胀，引起体积的变化，有可能使合格的模具尺寸超差，影响零件精度。通常要求残余线变形不超过0.2%。

3）良好的高温机械性能。模具在高温下要有足够的强度和韧性，在工作压力下才不会破裂，还需要有足够的持久强度和抗蠕变性能，即使在长时间热压作用下，模具也不会变形。同时应有较高的热硬度（红硬性），能在热成形过程中抵抗成形材料变形时的摩擦，不致产生划伤和压痕。

4）较高的相变温度。在使用温度范围内不发生相的转变，否则会引起模具体积的变化，影响零件精度。对钛和钛合金超塑成形的模具，模具材料的相变点应超过950℃。

5）良好的急热急冷性能（抗热冲击性）。模具加热到某一温度后，因取放零件或坯料会使模具温度急剧下降，内外产生较大的温度梯度，引起热应力，造成模具变形，甚至开裂。因此，要求模具材料能抗热冲击，有足够高的导热系数，使热量迅速传递，减少模具的内外温差。

6）良好的机械加工性能。模具要经过铸造、锻造与各种切削加工等才能获得所需的型面和尺寸。有些材料各种高温性能都好，但加工性很差，无法用作模具材料。材料加工性能往往与耐热性有矛盾，耐热性越好，加工性越差，故选材时必须兼顾。

（2）常用模具材料

常用的模具材料有碳素钢（如45钢及T10A等）、合金钢（如Cr12、Cr12Mo、GCr15及$3Cr_2W_8$等）及镍基合金等，主要根据成形温度来决定。镍基合金的价格昂贵，在成形温度很高时才选用。超塑性合金用的模具材料见表7.4-8。

表7.4-8 几种超塑性合金用的模具材料

超塑性合金	模具材料
Zn-22Al	Q235-A、45钢，小批量时也可采用耐热水泥、铸铝、铸铁、石墨、石膏、陶瓷、耐热塑料等
AL-6Cu-0.5Zr Supral合金	砂型铸铝、混凝土、铸铁、低碳钢等
Ti-6Al-4V	22Cr4Ni9Mn、耐高温铸铁、K-3、超合金及其他耐热钢、碳/碳复合材料
IN-744不锈钢	铸造陶瓷、超合金钢等

对于锌铝合金，由于超塑性的温度为250℃，模具材料较易解决，一般可用Cr12，Cr12Mo，Cr12MoV等材料制作。

使用温度在400～650℃范围内的高温模具，其材料多用低合金模具钢（锻模钢）。其合金元素含量较低，在1.0%～7.0%左右，一般含有镍、铬、钴、钨、钼和钒等元素，以提高材料的热强度、热硬度、高温抗氧化性和抗生长性。同时由于合金元素含量较低，可降低成本，提高切削加工性。如在更高的温度下使用，其抗氧化性明显下降，使用寿命较低。这类材料有CrWMn、5CrMnMo、4Cr5MoSiV、3Cr2W8V等，对于铝合金超塑成形用的模具材料，可采用低合金模具钢。对于钛板超塑性成形用的模具材料有耐热钢、耐热铸铁和耐高温陶瓷等。

耐高温陶瓷材料主要有水玻璃陶瓷、磷酸铝陶瓷、石英陶瓷、耐高温水泥陶瓷、碳化硅陶瓷等。陶瓷材料具有很高的抗氧化性和耐热性，具有高温组织稳定、抗生长性好、线膨胀系数小、抗压强度和硬度值高、成形工艺简单、成本低廉、资源丰富等优点。但其抗拉强度和耐急冷急热性能远不如金属材料。表7.4-9列出耐高温陶瓷材料的组成。

表7.4-9 高温陶瓷材料

化学组成		黏结剂	
化合物	聚合物	高温固化	常温固化
氧化物：Al_2O_3，SiO_2，TiO_2，MgO，ZrO_2 氮化物：SiN_3，BN 碳化物：SiC，TiC，WC 石墨	钒　土：$SiO_2\cdot Al_2O_3\cdot TiO_2\cdot Fe_2O_3$ 焦宝石：$SiO_2\cdot Al_2O_3\cdot TiO_2$ 高岭土：$Al_2O_3\cdot 2SiO_2\cdot 2H_2O$ 铬钢玉：$Al_2O_3\cdot SiO_2\cdot FeO_2\cdot Cr_2O_2$ 莫来石：$3Al_2O_3\cdot 2SiO_2$ 叶蜡石：$Al_2O_3\cdot 4SiO_2\cdot H_2O$	水玻璃、磷酸铝、黏土	耐高温水泥

非金属陶瓷模具常用两种典型方法制造，一种是浇注，如图7.4-30所示，另一种是压制，见图7.4-31。浇注或压制成模具的坯料后，必须经过严格的烘干和烧结程序，才能获得良好的陶瓷模具。烧成后的模具型面，有时要进行一些修正，可以采用磨削或抛光。

保证金属模具型面要求的加工方法有液压靠模铣削，数控铣床铣削和电火花加工等。

3.2 模具设计

（1）型面几何尺寸的计算

确定模具型面尺寸的原则是保证零件成形后在常温下符合图纸尺寸的要求。确定模具尺寸的依据是零件图样或样板尺寸、零件材料和模具材料以及成形温度。

由常温下零件的名义尺寸L_{cj}计算常温下模具的名义尺寸L_{cm}、成形温度下零件的名义尺寸L_{gj}及成形温度下模具的名义尺寸L_{gm}的公式如下：

$$L_{cm}=\frac{1+\alpha_j\Delta t}{1+\alpha_m\Delta t}L_{cj} \tag{7.4-3}$$

$$L_{gj}=L_{cj}(1+\alpha_j\Delta t) \tag{7.4-4}$$

$$L_{gm}=L_{cm}(1+\alpha_m\Delta t) \tag{7.4-5}$$

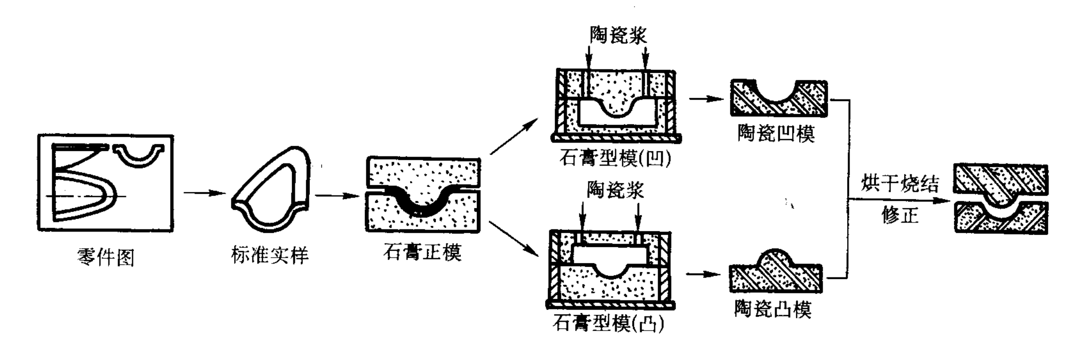


图 7.4-30 陶瓷模具浇注制造工艺过程

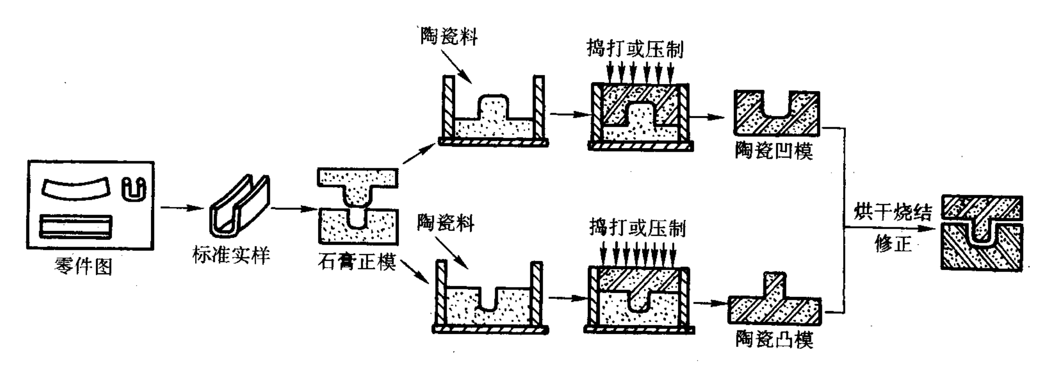


图 7.4-31 陶瓷模具压制制造工艺过程

式中，α_m 为成形温度下模具的热膨胀系数；α_j 为成形温度下零件的热膨胀系数；Δt 为成形温度和常温的温差。为简便起见，有时直接取为成形温度，℃。

常温下模具的名义尺寸与常温下零件尺寸的差值为

$$\Delta L_s = L_{cj} \times \Delta t \times \frac{\alpha_j - \alpha_m}{1 + \alpha_m \Delta t} \tag{7.4-6}$$

由上式可知：

1）当 $\alpha_j = \alpha_m$，即零件材料和模具材料的热膨胀系数相同，$\Delta L_s = 0$，模具名义尺寸就等于零件的名义尺寸。

2）当 $\alpha_j > \alpha_m$，$\Delta L_s > 0$，$L_{cm} = L_{cj} + \Delta L_s$，模具的名义尺寸需要放大。

3）当 $\alpha_j < \alpha_m$，$\Delta L_s < 0$，$L_{cm} = L_{cj} - \Delta L_s$，模具的名义尺寸需要缩小。

零件和模具材料的热膨胀系数是不同的，钛及其合金的线膨胀系数为（8～10）$\times 10^{-6}$/℃；耐热金属材料的线膨胀系数为（10～20）$\times 10^{-6}$/℃；陶瓷材料为（3～7）$\times 10^{-6}$/℃。

（2）模具设计问题

1）气密形式。气压成形必须在一定的气压下才能实现，气体的泄漏将导致成形失败。因此，超塑成形时的密封问题十分重要，在模具结构上要保证气密。

① 梗－槽密封。在模具上平面周围制作偶合的凸梗与凹槽，利用专用设备或压床将板料按梗－槽的形状变形，压紧，阻止气体外泄，达到密封的目的，如图 7.4-32 所示。一般设计一对凸梗－凹槽，即可保证工件气密，必要时也可采用两对梗－槽。

② 密封环密封。如图 7.4-33，密封环可用耐热合金制成。

③ 袋式密封。如图 7.4-34，利用板料焊成袋式，保证气密。

2）排气孔、槽　排气孔一般安排在成形过程坯料最后到达部位，排气槽除槽口外应安排在非模具型面部位。

排气孔直径：$d \leqslant t/2$；

排气槽深度：$h = 0.15 \sim 0.2$ mm。

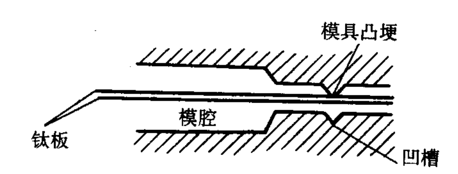


图 7.4-32 梗－槽密封

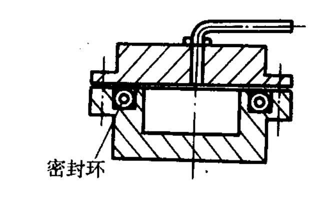


图 7.4-33 密封环密封

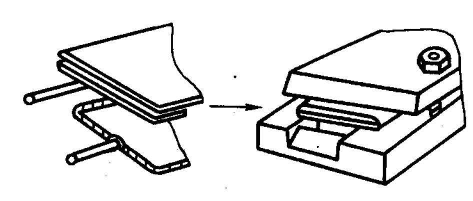


图 7.4-34 袋式密封

图为 7.4-35 为气压成形模示意图，图中可见到排气孔位置。

3）零件脱模方式。采用组合式模芯和拔模斜度办法，钛合金的拔模斜度在 700℃以上卸模时选 3°～7°，400℃以下时选 10°～20°。

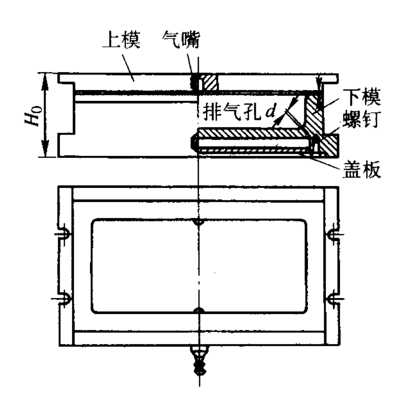


图 7.4-35　气压成形模上的排气孔

4　超塑性成形设备

4.1　基本要求

超塑性成形设备要满足以下基本要求：

1）可加热：使用温度应满足超塑性合金成形温度的要求，工作区温度均匀。

2）可加压：施加的压力应满足气压成形时的气密要求，应大于所需的成形压力。

3）可抽真空。

4）隔热保温效果良好。

5）结构合理、功率适中、操作方便、维修容易。

4.2　基本组成

（1）热源与温控系统

有下列几种加热方法：

1）模具通过紧固件加紧板料后，在电炉内加热（图 7.4-36）。一般用于小而且形状简单的试验件的试验。

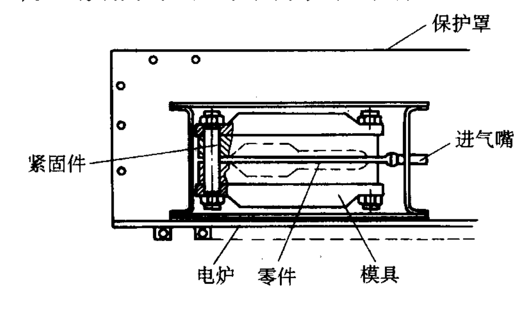


图 7.4-36　电炉内加热

2）电炉式压床加热，如图 7.4-37 所示。这种方法多用于试验室，进行结构件试验。

3）电热平台式压床加热，如图 7.4-38 所示。这种方法是目前实际应用最多的一种。

4）感应圈感应加热，如图 7.4-39 所示。这是一种实用性比较有限的加热方法。

（2）加压与气源系统

加压一般采用压机类结构形式，可利用合适的普通液压机或设计制造专用机床。简易装置可用千斤顶加压，甚至用机械连接件压紧。

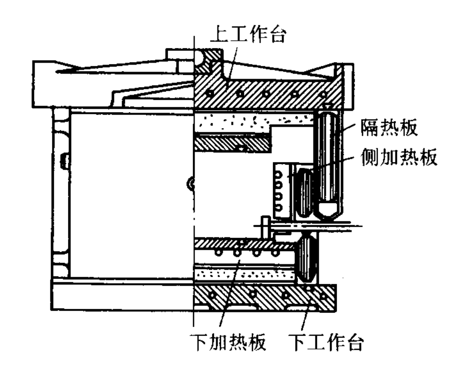


图 7.4-37　电炉式压床加热

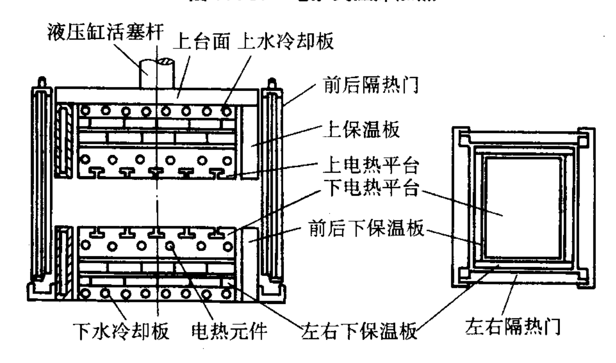


图 7.4-38　电热平台式压床加热

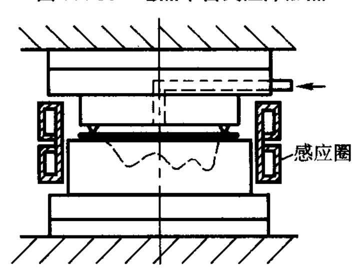


图 7.4-39　感应圈感应加热

气压成形所需的气源系统如图 7.4-40 所示。

减压阀(低压)　流量计　标准压力表　截止阀　节流阀　排气阀　气瓶　减压阀(中压)

图 7.4-40　感应圈感应加热

4.3　国外超塑性成形设备

目前美、英等国超塑性成形设备见表 7.4-10。

表 7.4-10　国外超塑成形设备情况

国别	有关公司（厂家）	规　格　性　能
美国	麦道公司	1）利用普通压力机改装的工作压力为 6 000 kN 的超塑成形机（Murdock 公司承制） 2）工作压力为 3 000 kN 和 4 000 kN 的压力机，10 000 kN 的龙门式压力机，均为 Williams－White 公司承制 3）工作压力为 24 000 kN 的压力机，行程 1 270 mm，平台有效面积 2 438 mm × 1 219 mm，模具温度可控制在工作温度的 0.2%，模具最大充气压力可调到 4.2 MPa，控制系统采用 PLC，该设备由英国的曼彻斯特液压公司承制

续表 7.4-10

国别	有关公司（厂家）	规格性能
美国	洛克威尔公司	工作压力为5 000 kN和6 000 kN的立式压力机，10 000 kN的SPF专用压力机
	格鲁曼公司	压力为10 000 kN，C形框式专用压力机，下工作台为活动式，装卸零件可以移出来
	罗尔公司	钛合金SPF压力机，可生产350～400种零件
	LTV公司	带有CNC系统的超塑成形机床，可加工的零件尺寸为1 200 mm×3 600 mm×6.3 mm，工作温度可达930℃
英国	菲尔顿工厂	SPF专用压力机，加热平台台面601 mm×601 mm～1 828 mm×1 219 mm
	沃顿工厂	1 500 kN压力机，单位压力可达2.11 MPa；5 000 kN压力机，其电热平台的温度可控，台面尺寸为1 219 mm×792 mm
	哈特菲尔德工厂	5 000 kN压力机
	TKR公司	SPF压力机，最高工作温度达1 000℃，最大平台尺寸为4 604 mm×609 mm×609 mm和2 413 mm×1 424 mm×762 mm，最大工作压力为6 000 kN

5 超塑成形/扩散连接技术

超塑成形/扩散连接组合工艺（Superplastic Forming/Diffusion Bonding，简称SPF/DB）目前应用于钛合金Ti-6Al-4V比较多，在铝、镁等合金成形上也有应用。

钛合金超塑性成形（SPF）所要求的环境和条件（真空度或氩气保护、温度和压力）是与扩散连接（DB）接近的，这就是这种组合技术的基础。用钛合金进行超塑性成形时，可以同时完成扩散连接，用于制造钛合金夹层结构、整体框、加强壁板和舱门等构件。钛合金结构的扩散连接和超塑性成形在同一工装中先后完成，即在同一工装中先扩散连接而后超塑性成形或者先超塑成形而后扩散连接。

5.1 钣金的扩散连接

（1）扩散连接的定义

扩散连接是一种对同种或异种的金属或非金属材料进行连接的工艺过程。钣金的扩散连接是靠高温下材料表面的局部塑性变形而使接触面贴紧，以保证连接材料表面层上的相互扩散，产生原子量级上的结合，从而获得一种整体接合的技术。

（2）主要工艺影响因素

温度、压力、保温时间、连接工件的表面状态、连接材料及中间扩散层的冶金特征等是影响扩散连接过程和接头质量的主要因素。

1）温度。一般情况下，扩散连接接合强度随着温度升高而增加，但提高温度只能在一定范围内有效。通常扩散连接温度的选择范围为

$$T_{DB}=(0.5\sim0.7)\ T_m \qquad (7.4\text{-}7)$$

式中，T_{DB}为材料扩散连接热力学温度；T_m为材料熔点热力学温度。

钛（工业纯钛）、钛合金及一些金属材料的扩散连接温度列于表7.4-11。对同一种材料，由于其他条件不同，最佳扩散连接温度因之改变。扩散连接温度的选择应保证在尽可能短的时间内获得最好的连接质量，达到完全的冶金连接而又不使接头及基体材料发生不希望的冶金变化以保证基体材料的性能。对于某一个特定的工件，扩散连接温度的选择应考虑下列因素：

① 生产率：由于扩散系数与温度成指数函数关系，温度增高时原子动能加大，当扩散系数越大时所施加的压力可相应减少，因此应尽可能选择较高的加热温度。

② 被连接材料的冶金特征。

③ 在扩散连接时应统一考虑连接材料的热处理规范。

④ 扩散连接接头的变形与残余应力：温度愈高，变形与残余应力就相应增大。

⑤ 扩散连接接头的强度。

图7.4-41表示纯钛连接接头在不同压力情况下，温度的升高对接头强度的影响。随着温度的提高，接头强度迅速增加，但随着压力的增大，温度的影响逐渐减小。当其他连接条件不变时，提高温度只能在一定范围内提高接头强度。由于温度过高将引起接头冶金性能的改变，接头强度反而下降。

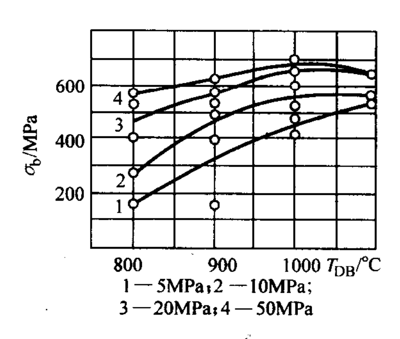


图7.4-41 连接温度对接头强度的影响

2）压力。压力的主要作用是使连接表面产生微观塑性流变，以达到最大的紧密接触，形成金属键和建立原子相互扩散的条件。在某些情况下，压力还有利于防止扩散孔洞的产生。压力愈大界面孔洞消失愈快。所谓界面孔洞就是微观凹凸不平的连接表面在连接加压时残留下来的微小孔洞。这些孔洞既影响接头性能又阻碍晶粒生长和晶界穿过原始界面的移动。完全以扩散消除界面孔洞需要很长的时间，尤其是包含在晶粒内部的孔洞。在不同类材料扩散时，由于化学成分不同，某些元素的原子具有较大的扩散系数，大量穿过界面向另一种金属中扩散，而向反方向扩散的某些元素的原子由于扩散系数较小，因此数量很少，造成了通过界面向各个方向扩散迁移的原子数量不相等，出多于进的那边就有大量的空位集聚起来，达到一定密度后即凝聚成孔洞，这种孔洞就是扩散孔洞。扩散孔洞可在连接过程中产生，也可在连接后在高温下长期工作的过程中产生。

压力是决定扩散连接表面能否紧密接触的重要因素。图7.4-42表示Ti-6Al-4V在940℃下的连接质量与压力和时间的关系。在实线上方能获得良好的连接（100%），在虚线下方则不能获得良好的连接质量（小于50%）。可见，在短时间内，只要压力很高，即使扩散不充分，也能连接；但压力不



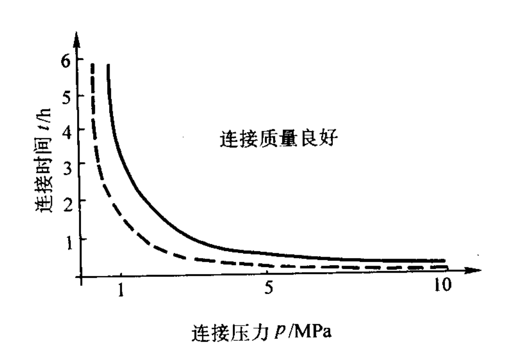


图 7.4-42 Ti-6Al-4V 扩散连接压力对连接质量的影响

宜太大，否则对扩散连接带来许多不利因素，如设备能力、模具强度和零件变形等。因此，扩散连接希望在低压或超低压下进行。对钛合金来说，扩散连接压力在 0.5 ~ 30 MPa 均能获得良好的连接强度。到一定压力后，即使压力继续增加，对强度提高作用也不大（如图 7.4-43）。

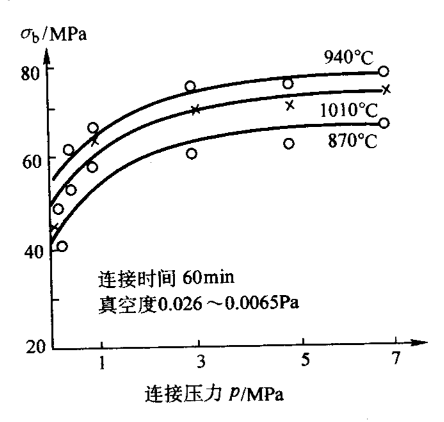


图 7.4-43 TC4 与 TC4 连接压力对连接强度的影响

3）时间。扩散、蠕变均与时间有关，扩散连接要获得良好的连接质量，必须有一定的时间过程。以保证扩散、蠕变和再结晶能充分进行。而时间的长短取决于温度与压力，一般来说，温度高、压力高，时间可以缩短。图 7.4-44 表示 Ti-6Al-4V 不同连接时间与连接强度的关系。可以看出，随时间增长，连接强度逐步增加，到一定时间后不再增加，反而下降。原因也是由于时间加长，晶体变得粗大，引起强度下降。因此，对 Ti-6Al-4V 来说，连接时间一般不超过 3 h。若温度、压力较低，时间可以增加到 4 ~ 6 h。例如蜂窝结构夹层板的 SPF/DB 成形，压力很低，约 0.01 MPa 左右，温度为 880 ~ 920℃，这时时间必须加长，才能获得良好的连接。

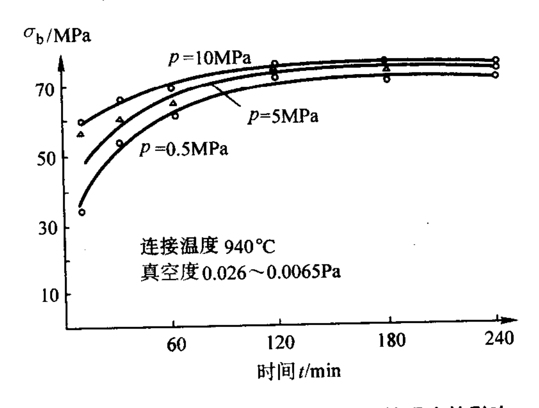


图 7.4-44 TC4 与 TC4 连接时间对连接强度的影响

图 7.4-45 和图 7.4-46 为 Ti-5Al-2.5Sn 的相对伸长率和冲击韧度与扩散连接时间的关系。可以看出，扩散连接接头的强度、塑性、伸长率和冲击韧度与时间的关系是在连接开始的几分钟内随时间的增加而增加；达到一定时间后，即趋于稳定，不再有明显的增长。从提高生产效率的角度看，连接时间越短越好，要缩短时间必须相应地提高温度及压力。

一般压力与时间成反比关系，而且与温度也有密切关系。压力推荐范围为 1 ~ 2 MPa，保压时间为 20 ~ 90 min。

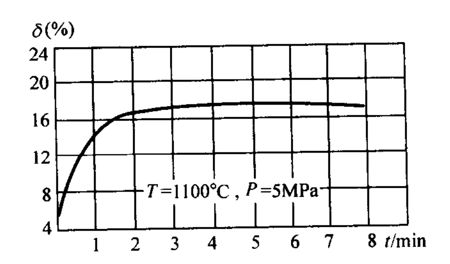


图 7.4-45 相对伸长率与时间的关系

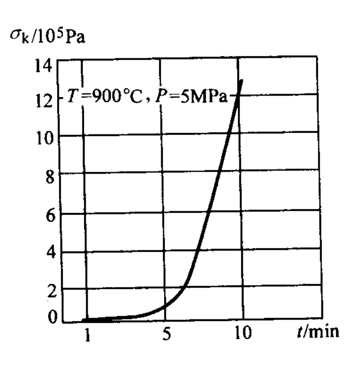


图 7.4-46 冲击韧度与时间的关系

4）材质和表面状态。连接件的表面应洁净，可采用诸如酸洗、真空烘烤、辉光放电清洗、超声波净化或化学溶剂等方法进行去除氧化膜、有机物和油腻等污染层。

① 机械加工。如车、铣、磨和抛光等机械加工后的表面常残留加工硬化薄层，硬化层内晶体缺陷密度很高，原子扩散的激活能大大下降，因此再结晶温度比其他部分要低，这有利于扩散连接。但对某些根本不希望产生再结晶的金属和合金，就不能采用机械加工的方法作为表面制备的最后工序。

② 化学浸蚀和剥离。使用这种方法可以消除非金属表面膜，如氧化膜等，同时还可以将部分或全部机械加工产生的加工硬化层浸蚀或剥离掉。浸蚀剂根据材料选择，一般可参考使用金相浸蚀剂或材料轧制过程中采用的浸蚀剂。

③ 真空烘烤。在真空中烘烤可有效地消除有机物、水分和气体吸附层。真空烘烤不能除去稳定的氧化膜（如 Al、Ti 和 Cr 的氧化膜）。烘烤温度在 300℃左右，视材料性质而定。经过真空烘烤后的表面要放置于真空或保护气氛的贮存器内，以免重新被污染。

④ 辉光放电清洗。辉光放电清洗就是利用辉光放电加热。工件为阴极，在辉光放电过程中电离后的 A_r^+ 撞击阴极，阴极发生雾化作用而清洗工件连接表面。

⑤ 去油清洗。工件的连接表面用酒精、三氯乙烯、丙酮或清洗剂等化学溶剂清洗除油。

此外，还可用超声波净化被连接的工件表面。

（3）扩散连接方法

1）无中间层同类材料的扩散连接。目前钛合金组合工艺常用这种方法。同类材料扩散连接时，温度、压力、保温时间及表面质量的保证是主要的技术因素。因为无中间扩散层，一般所需压力较大，要求较高的表面质量。但是试验表



明，磨光至 $R_a0.4\ \mu m$ 的连接表面反而不及精车至 $R_a1.6\ \mu m$ 的表面接头强度高，这是由于磨削砂轮上的砂粒镶嵌到金属晶粒中阻碍了扩散。在同一平面上有些部位需要连接有些部位不需连接时，例如金属蜂窝结构的扩散连接，可以在相连接部位进行化学浸蚀和剥离以去除各种非金局表面膜（如氧化膜等）及消除冷加工硬化层。另外也可以对全部表面进行化学浸蚀及剥离，处理后再对不应连接部位（如将进行超塑性成形部位）氧化。

同类材料接头不存在成分均匀化问题，连接时间可以缩短，如果只要求一定的接头强度而不要求界面完全消失及组织均匀化时，则更可缩短保温时间。

几种常用的同类材料扩散连接技术的工艺条件见表 7.4-11。

表 7.4-11 同类材料扩散连接工艺条件

连接材料	温度/℃	压力/MPa	时间/min	真空度/Pa
Ti-6Al-4V	925	1	90	氩气保护
Ti-2.25Al-11Sn-5Zr-1Mo-0.25Si	1 000	10	10	0.13
Ti-5Al-2.5Sn	1 000	5	5	0.13
Ti（75A）	704	7	10	0.13
工业纯钛	871	4	15	0.13
Ti-8Al-1Mo-1V	996	7	15	0.13
铝合金 AMr5	500	10	10	0.001 3
高速钢 W18Cr4V	1 100	10	5	0.13
45 钢	1 273	12	5	0.013
不锈钢 2Cr13	940～960	15	10	0.13

2）无中间层不同材料的扩散连接。在不同类材料的扩散连接中应注意考虑以下几个问题：

① 扩散孔洞问题。不同类材料扩散连接时，扩散孔洞的产生是一个很重要的问题，应予以特别注意。

② 中间相或中间化合物形成问题。对于二元系统相图中看到许多不能无限固溶而生成一系列中间化合物的情况，如果将这些金属进行相互扩散连接，则接头中将依照相图中成分的次序形成一系列化合物。由于各种化合物的形成和生长速度不同，某些化合物较厚，某些很薄，不同化合物对接头性能有着不同影响。接头中生成中间化合物后往往会变脆。对能生成中间化合物的金属材料进行扩散连接时，采用加中间过渡层的方法来防止，以免接头变脆。

③ 低熔点共晶相问题。不同类金属扩散连接时，常形成低熔点共晶相，由于低熔点相的存在，限制了连接时使用的温度，以避免性能的变坏。但为了加速扩散连接过程，降低连接温度、简化表面制备要求，可以应用低熔点共晶反应，生成少量液相，连接后再通过一定的扩散处理消除这些低熔点相，使接头获得与基体完全相等的性能。

④ 线膨胀差问题。不同类材料膨胀系数不同，接头内就要产生热应力。有时膨胀差带来的问题很严重。

表 7.4-12 列出了几种不同材料的扩散连接条件。

表 7.4-12 几种不同材料的扩散连接条件

连接材料	温度/℃	压力/MPa	时间/min	真空度/Pa	表面制备质量 $R_a/\mu m$
钛合金 BT_1 + 铝合金 AД1	600	8	30	0.13	6.3～3.2
钛合金 BT_1 + 3 钢	800	7	12	0.013	6.3～3.2
钛合金 BT_1 + 铜 MБ	850	5	15	0.013	1.6
铝合金 2219 + Ti-5Al-2.5Sn	910	—	30	—	—
铜 + 镀铜氧化铝陶瓷	750～800	7	12	0.013	—
铜 + 钼	800～850	20	10～15	0.13	3.2～1.6
铝合金 AД1 + 铜 MБ	400	8	20	0.13	6.3～3.2
钛合金 BT_{5-1} + 耐腐蚀钢 X25H15	900	9	10	0.000 013	—

3）加中间层的扩散连接。加中间扩散层的扩散连接具有很多优点，为更好地实现组合工艺提供更广泛的工艺基础。其主要优点概括如下：

① 利用活化扩散元素或低熔共晶反应促进扩散过程。

② 降低对连接表面制备质量的要求。

③ 可降低连接温度与压力、从而减少工件的变形。

④ 扩大连接范围。可连接异种金属、非金属等在冶金上完全不相容的材料。

⑤ 根据需要，可防止中间金属化合物和低熔点共晶相的生成。

中间层材料相对基体材料应具备下列性能：

① 容易向基体金属中扩散，或含降低中间扩散层熔点的元素，如硼、铍、硅等。

② 塑性好，易变形，热膨胀系数与基体材料相近。

③ 不与基体材料产生不希望的冶金反应。

④ 扩散到基体内以后，对基体性能没有不良影响。

中间扩散层材料可以是纯金属，如钛、镍、铜、铝等，也可以是含有活化扩散元素或降低熔点的元素，而成分与基



体相近似的合金。许多钎焊合金常被用作中间扩散层材料。

几种材料加中间层扩散连接的条件见表7.4-13。

表8.4-13 几种材料夹中间层的扩散连接条件

连接材料	中间层材料	温度/℃	压力/MPa	时间/min	附注
铝合金7075T6	纯铝（或7072）	163	168	60	
Mo-0.5Ti	Ti	915	70	20	
Mo	Ti	927	70	20	
钛合金Ti-6Al-4V	银（加入0.2%锂）	972			过渡液相法
钛合金Ti-6Al-4V+不锈钢304L	Au-Li合金	566	7	10	
Ti（75A）	铝	371		120	
铝合金2219Al+钛合金Ti-5Al-2.5Sn	银	800~1 000	10.6~17.6	10~20	真空度0.13
钛合金BT_{5-1}+钢12Cr-18Ni+10Ti	钒+铜+镍	1 000	20	30	真空度0.013
钛合金BT_{5-1}+纯铁	钼	1 000	5	15	带状夹层真空轧制
铝	硅	871	7	180	在惰性气体中连接
铌合金BH_3	镍	582	7~14	1	
Ta-10W	钽	982	7	90	氦中连接
钽	钛	1 427	7~14	1	
钨	Ni-Pd	1 150~1 180	5~7		真空度0.013
硬质合金BK15+工具钢Y8	Fe+50%Ni	800~1 100	5~20	5~30	真空度0.013
硬质合金BK20+马氏体钢18Cr-2Ni-4BA	镍箔Ni_2	1 040		30~120	

4）过渡液相（简称TLP）扩散连接。这种技术兼具固态扩散连接和钎焊的优点，与扩散连接的区别是不需很高的表面制备质量和大的压力，一般用零件本身的质量即可；与钎焊不同的是所用中间层生成的液体比钎焊时少，在保温扩散中等温凝固，并在随后的扩散处理过程中与基体均匀化，接头无铸态组织。所用中间层的成分大都与基体相似，但含有如Be、Li、B、Si、Mn、Ti和Nb等降低熔点的元素，其厚度在0.03~0.1 mm之间。图7.4-47为过渡液相真空扩散连接过程。

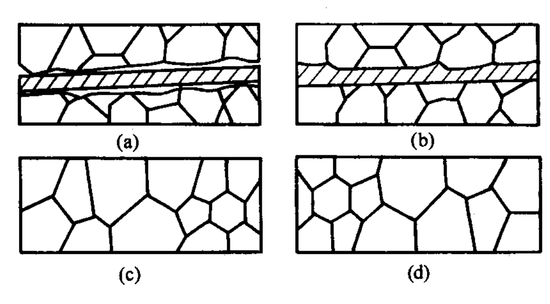


图7.4-47 过渡液相真空扩散连接过程

首先将形成过渡液相的中间层材料夹在两连接表面间，如图7.4-47a；在工件上施加很小的压力（0~0.07×10^{-6}Pa)，并迅速加热工件，使中间层材料熔化，形成一薄层液相，见图7.4-47b；中间层材料完全熔化充满整个间隙后，保持恒定温度，通过液-固相间的扩散，组成新的金属合金而逐渐凝固，如图7.4-47c；为获得成分和组织都很均匀、性能与基体一样的接合面，继续进行扩散处理，见图7.4-47d。扩散处理可在等温凝固后进行，也可在冷却后再行加热，分成几个阶段去进行。处理时的加热温度可根据需要来选择，只要不使接合面重新熔化即可。

5.2 组合工艺（SPF/DB）的工艺方法与典型结构

（1）SPF/DB工艺方法

实现SPF/DB组合工艺的具体方法按SPF和DB的顺序可分为三种方式：

1）先DB后SPF。这种方法优点是模具结构简单，可用模腔内充气加压或模具直接加压。但在不连接部分需要先涂上隔离剂，增加了工序。而且，如果涂层厚度不均、位置不准会使结构件外表面产生沟槽。

2）先SPF后DB。此方法可不涂隔离剂，用气囊充气加压或加垫板加压。但模具结构复杂，扩散连接面保护困难，连接强度可能受到影响。

3）SPF和DB同时进行。该方法具有以上二者的特点，并能提高生产效率，但工艺复杂，模具结构也复杂。

（2）SPF/DB典型结构

钛合金超塑成形/扩散连接的典型结构有三种基本形式，如图7.4-48所示。

1）局部加强结构。单块钛合金板超塑成形时，与预先放在模具内的钛合金件相接触而扩散连接。用该法可将附加板、垫板或其他加强件与零件扩散连接，使零件局部加强。图7.4-48a是单层加强板结构，即在超塑性成形件上扩散连接加强板，以增加结构的刚度和强度。这种结构可用于飞机和航天器上的加强框和肋以及翼梁等。

2）整体加强结构。用两块钛合金板，将待成形部位涂敷隔离剂，未涂隔离剂的部位先行扩散成一体，再使涂有隔离剂的部位成形，可制造帽形或波形等截面的整体加强构件。图7.4-48b是双层板结构，内层板成形SPF件。在超塑成形的地方，内层板与外层板两板之间涂有隔离剂，需扩散连接处保持清洁的表面。这种结构可用于舱门和翼面等。

3）夹层结构。这种结构用三块或四块钛合金板，在两个接触面上的一定部位涂敷隔离剂，先进行扩散连接随即超塑成形至最终构件。图7.4-48c是多层板结构，这种多层结构件常用作飞机翼面、机身壁板和整体翼面、发动机叶片、进气道以及换热器等。



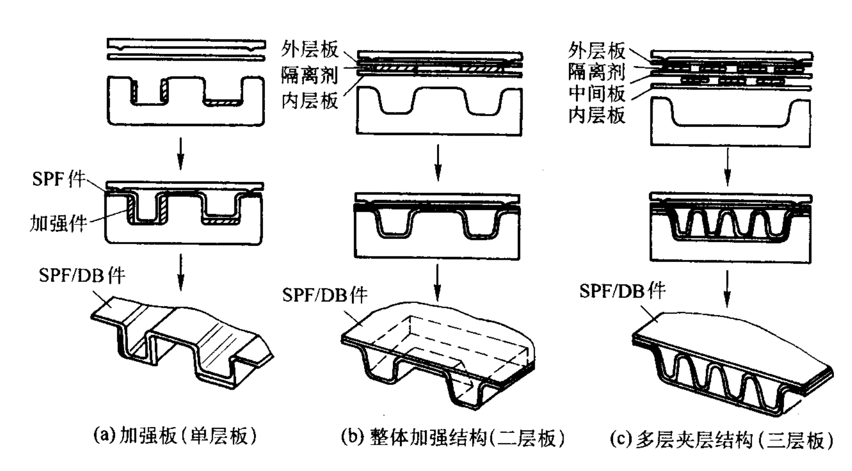


图 7.4-48 SPF/DB 结构基本形式

5.3 超塑成形/扩散连接工艺的应用

(1) 主要工艺问题

SPF/DB 组合工艺在应用中存在一些需要注意的工艺问题，主要有：

1) 进气方式。当工艺参数和工艺流程确定之后，零件能否成形，完全取决于进气方法。进气方式要根据具体零件结构选用。

2) 加压方式。当压力参数确定后，DB 质量的优劣，关键在于用合适的加压方式，要求加压部位适当和压力均匀。

3) 高温保护。高温保护方式是扩散连接成败的关键。

4) 构件脱模。在 SPF/DB 状态下，构件处于半黏性软化状态，加之钛合金在高温下极易被污染。若在高温下脱模，构件极易变形和氧化；若在室温下脱模，由于钛合金的膨胀系数远较模具材料的膨胀系数小，故在凹模成形时，构件往往被“卡死”。因此，除成形时必须涂高温润滑剂外，模具结构设计时也必须考虑构件脱模方法或做出一定的拔模斜度。

5) 蒙皮拉深沟槽。在 SPF/DB 时，在构件的成形和焊接的交界处会出现突变，产生沟槽，使表面不平整。它与涂隔离剂涂层过窄有关，此外与模具局部变形和成形时定位有关。

6) 壁厚变薄不均。SPF/DB 构件壁厚变薄不均，仍是成形工艺中的重要问题。特别是当形状较复杂时，即使采用微机控制，也难以达到完全均匀。因此，在结构件设计时，必须考虑补偿措施。

其他还有模具材质、模具结构以及设备等都是 SPF/DB 中的重要问题。

(2) 典型工艺

现以生产图 7.4-48b 的典型结构为例，加以说明。

1) 原材料和坯料的制备。应用最广的钛合金为 Ti-6Al-4（国内牌号为 TC4）。国产的细晶 TC4 板材的 SPF/DB 性能良好，可满足结构设计的要求。坯料的制备工艺如下。

① 原材料的检验。对工厂提供的 TC4 板材进行力学性能金相组织检查。

② 下料。按坯料外形尺寸剪切，注意剪刀要专用，避免与铝、铜混剪，以防污染。

③ 表面清洗。为了获得良好的扩散连接质量，钛合金表面必须清洁。首先应除油，可采用汽油、丙酮、乙醇等溶剂擦拭，用三氯乙烯蒸气除油效果更佳，也可采用异丙醇、甲基-乙基酮。然后进行酸洗，去除表面氧化层，常用的酸洗液配比见表 7.4-14。酸洗后经冷热水冲洗，然后还须放入中和液中中和，其配比见表 7.4-15，再经冷热水冲洗后，烘干即可。

表 7.4-14 TC4 酸洗液配比表

HNO_3（相对密度 14.2）	HF	溶液温度	清洗时间
400 ~ 420 g/L	26 ~ 30 g/L	30℃ ± 2℃	2 ~ 5 s

表 7.4-15 TC4 中和液配比表

Na_2CO_3	溶液温度	中和时间
30 ~ 50 g/L	25℃	1 ~ 2 s

④ 涂隔离剂。对于无需连接处，或要超塑成形处，必须涂上隔离剂，以防粘连。目前工业上应用的隔离剂有氧化钇、氮化硅、石墨、KBC 以及其他有机或无机的玻璃涂料。在高温下对钛无污染、工艺又方便的是氧化钇和氮化硅。

在涂刷之前，必须按结构要求做好涂刷隔离剂的样板，在进气道和超塑性成形处涂上隔离剂。

⑤ 焊封口袋。将两块钛板（其中一块上涂有隔离剂），对合在一起，并将四周封焊。

⑥ 制进气口

a) 垂直进气法。见图 7.4-49。图中上、下钛板四周用氩弧焊密封。为了便于通气，在钛板上预先铣出一个凹槽腔，并在下钛板上钻制一孔与通气管紧密配合。上、下模的通气口 1 和 3 为抽真空口，通气口 2 既能抽真空，又可充氩气成形。扩散连接靠上、下模加压，也可以在通气口 3 内先充氩气加压，使上下钛板未涂隔离剂的部位扩散连接好，再在 3 口抽真空，2 口充氩气，进行超塑成形。该方法进气畅通，密封可靠，便于扩散连接成形，但模具结构复杂。

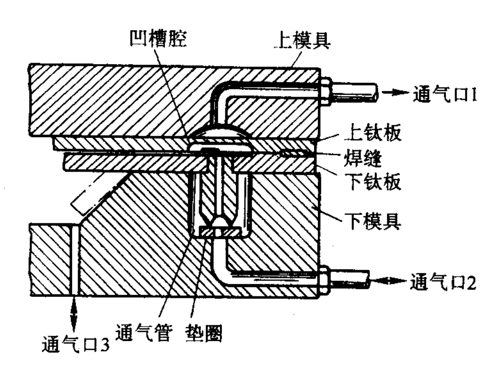


图 7.4-49 垂直进气法



b）垂直焊嘴进气法。见图7.4-50。图中上、下钛板，四周焊接密封。抽真空、进气口与上钛板焊牢并密封。此法简单可靠，气路畅通，但上模要留出焊嘴的空间。

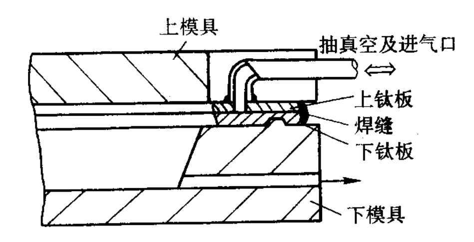


图7.4-50 垂直焊嘴进气法

c）水平焊嘴进气法，见图7.4-51。图中焊嘴直接焊在上、下钛板之间。这样制造简单，但上下模的密封凸梗会压堵气路，使进气不畅。因此，对厚1.5 mm以上的板可以应用此法，预先在钛板上开出通气凹槽，解决气路压堵。对厚1.5 mm以下的板料建议用方法一或二为好。

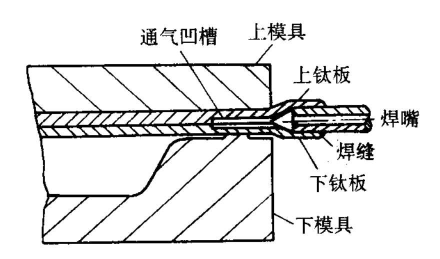


图7.4-51 水平焊嘴进气法

⑦ 充氩气检验。在焊好的坯料中，充进氩气，检验由钛板和气咀焊成的气袋的密封性和焊缝质量。

2）成形前准备

① 模具检验。检查模具尺寸与形状、表面质量和定位对合情况。对用过的模具必须清理表面，使之无污染、无划痕等。

② 涂脱模剂。模具表面应涂上脱模剂或脱模涂料，以便SPF/DB结构件从模内取出。常用的脱模剂与隔离剂是一样的涂料，或用其他惰性高温涂料。

③ 坯料安装。钛板坯料安装到模具内，定位应正确、可靠。

④ 置入电炉。将装好的模具送进电炉或加热装置内，接上各种管路接头，确保密封、畅通。若模具内有加热元件，就置入保温装置内。

3）超塑成形/扩散连接

① 抽真空或充氩气。对模具腔内和钛板焊接口袋内抽真空，或连续充氩气和抽真空，用氩气“清洗”内腔，并保持一定的真空度。

② 加热模具。对模具进行加热，升温曲线见图7.4-52所示。整个升温、降温过程可分为三个阶段：

升温：即从室温升到工艺所需的温度，钛合金SPF/DB比较适合的温度为870~940℃。升温速率取决于模具的材料、尺寸大小和超塑性方式（恒温超塑性或升温超塑性）。

保温：升温到规定温度后，即需保温，其时间取决于模具的质量、尺寸大小和性能，以及SPF/DB的工艺时间（连续加压时间，即保压时间）。

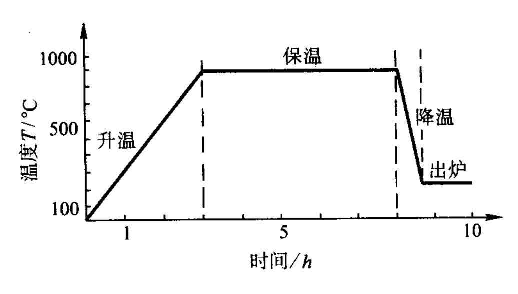


图7.4-52 SPF/DB加热曲线

降温：SPF/DB完成后，开始降温。这时，除模具条件外，还取决于对SPF/DB的性能要求。从规定温度降到室温或200℃以下，即可出炉。

③ 加压扩散连接。模腔内充氩气加压，使两块钛板之间未涂隔离剂处进行扩散连接。保压时间由工艺参数试验确定，一般为10~200 MPa，见图7.4-53。

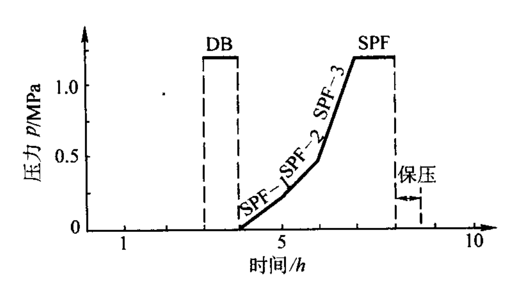


图7.4-53 SPF/DB加压曲线

④ 超塑性成形。模腔内抽真空，口袋内充氩气加压。加压过程中必须严格控制加压速度，以保证超塑成形达到某一个（最佳的）变形速率。因此，靠人控制已难以保证控制精度和重复精度，可以用微机实现控制超塑性成形的压力。通常控制单位时间内进气的压力来改变加压速度，其数值为0.002 5~0.025 MPa/min。在这个过程中，加压曲线取决于超塑成形件的形状和厚度，以及宽深比。为了使成形贴模，最后需要保持高压一段时间，然后降低压力，并保压到室温，可使成形件减少变形。

⑤ 卸载出炉。关电源、断管路、开模具、取工件，并切割修边。

⑥ 清洗检验。将SPF/DB件进行清洗，并检查外观。用超声波检查焊接面质量；用样板或夹具检查形状尺寸和配合精度。

4）破坏性检查　扩散连接面用超声波装置不能检查出微小的缺陷（<0.2 mm）。因此，还需要进行试件的破坏性检验，检查其焊接表面质量。

① 剖开断面进行金相观察，测出焊接线长度，求出焊成的百分比

$$L=(l_0-l')/l_0\times100\%$$

式中，L为焊接线焊成的百分数；l_0为焊接剖面上焊缝长度；l'为经焊接剖面观察，测量未焊成及有缺陷的各段总长度。

② 焊接剖面的拉伸试验，测出其连接强度。

（3）SPF/DB工艺的应用（表7.4-16）

表 7.4-16　超塑成形/扩散连接结构在飞行器上的应用

应用	构件名称	简　图
飞机	B-1B 型飞机上的壁板、舱门及其他构件	风档热空气喷嘴(SPF/DB) 发动机舱构件(SPF) 后舱壁板(SPF) 中央梁腹板(SPF) 发动机舱门(SPF/DB) 辅助动力装置舱门(SPF)
	钛合金机身结构中的龙骨和壁板等	隔框(SPF/DB) 波纹蒙皮(SPF/DB) 龙骨框架(SPF) 侧壁板(SPF/DB)
	战斗机上的 SPF/DB 结构部件：发动机控制装置的整流罩，热交换器排气管，机炮火焰口的防护罩等	发动机控制装置整流罩 机炮火焰口防护罩 热交换器排气管
	轰炸机带加强层流控制面桁架式钛 SPF/DB 的夹层结构	桁架式钛夹层结构
	在飞机通风散热系统中有 SPF/DB 结构件如热空气喷嘴、散热器以及管道等	
导弹	导弹筒体，带有双层内管道的钛合金进气道	



续表 7.4-16

应用	构件名称	简 图
导弹	导弹前段的三层结构	
	导弹翼面。上下为钛面板，中间为钛蜂窝结构，在超低压力下进行 SPF/DB	
航空发动机	航空发动机的定子和转子上的涡轮叶片，采用三层 SPF/DB 结构，类似于飞机上的整体翼面	定子叶片　转子叶片
航天飞机	用 SPF/DB 方法制造的多层板结构的钛合金金属热防护壁板	金属热防护层壁板

编写：李明哲（吉林大学）
蔡中义（吉林大学）

第5章 爆炸成形

爆炸成形是以炸药为能源，将化学能转变为机械能，以极高能率使坯料产生塑性变形的一种加工方法。它与常规的板料冲压方法相比，具有如下一些特点。

1）通常，爆炸成形时冲击波对坯料的作用时间为10～100 μs，而坯料变形时间仅为1 ms左右。在这种高速变形条件下，可大幅度提高材料的塑性。因此，爆炸成形可以加工用常规方法不易加工的低塑性材料。

2）爆炸成形可不用冲压设备，可能加工的零件尺寸不受冲压设备能力限制。因此，尤其适合大型冲压件的小批量或试生产。

3）爆炸成形属单模或无模加工方法，模具结构简单甚至无需模具。因此，生产周期短，生产成本低。

4）由于爆炸成形易产生强大噪声、介质飞溅、污染环境，而且生产率低；因此，一般不适合室内批量生产。

用爆炸成形方法可以对板料或管材进行拉深、胀形、翻边、冲孔、校形、弯曲、扩口、压印等加工。此外，还可以进行爆炸焊接、表面强化、管件结构装配、板材复合、粉末压制等。因此，在航空航天、兵器、机械、化工、汽车等工业中得到较广泛的应用。

1 工艺参数选择

图7.5-1是较常见的爆炸拉深装置之一。将坯料5放在压边圈4与凹模6之间，炸药1吊在水2中，引爆炸药，利用水中产生的巨大冲击波，使坯料进入凹模，完成拉深工序。爆炸成形的主要工艺参数有：药类、药形、药位、药量、介质、水深等，分述如下。

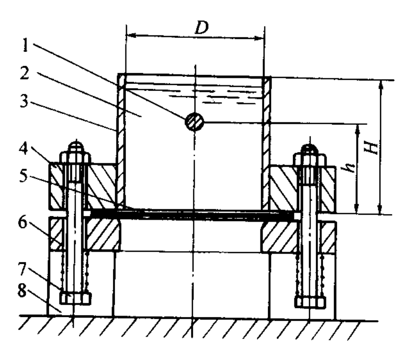


图7.5-1 爆炸拉深装置

1—炸药；2—水；3—水桶；4—压边圈；5—坯料；6—凹模；7—螺钉；8—底座

1.1 炸药种类

（1）对炸药的基本要求

1）具有足够的能量，能满足工程实用要求。

2）具有足够的稳定性，在存放期间不致发生物理性能、化学性能的变化，确保稳定的爆炸性能。

3）具有适当的敏感度，既要求装填处理时的安全性，又要保证使用引爆时的可靠性。

4）制造炸药的原料普遍，生产操作简便、成本低廉。

5）要求无味、无毒、无刺激等。

（2）炸药的分类

爆炸成形中使用的炸药主要有三类，即起爆药、猛性炸药及火药，可根据工件的材质、尺寸和形状合理选择。

1）起爆药。起爆药是用来激发他种炸药发生爆炸的炸药，其特点是非常敏感，在外界不大的机械或热作用下，即可引起爆炸，而且在很短的时间内爆速就会增长到最大值。

起爆药主要用于装填火帽和雷管。常见的起爆药有：

① 雷酸盐，如雷贡［$Hg(ONC)_2$］、雷银［$AgONC$］。

② 氮氢酸的衍生物，如氮化铅［$Pb(N_3)_2$］、氮化银［AgN_3］、三氮化氰［$C_3N_3(N_3)_3$］。

③ 斯蒂酚酸盐和苦味酸盐，如斯蒂酚酸铅［$C_6H_2(NO_2)_3O_2Pb$］。

④ 基特拉辛［$C_2H_8ON_{10}$］。

此外，还有各种单质起爆药的机械混合物。

2）猛性炸药。猛性炸药是爆炸成形最常用的炸药，它的敏感度较低，通常需用起爆药才能引爆。起爆后在起爆点形成一爆震波，并由药包内向外传播，同时引爆扫过的炸药。当爆震波到达药包表面时，炸药的爆炸过程基本结束。原药包空间高温、高压的爆炸产物（气团）在向外膨胀的同时形成一强烈的冲击波，作为爆炸成形的能源。常见的猛性炸药主要有：

① 芳香族的硝基化合物，如三硝基甲苯（梯恩梯TNT）［$C_6H_2(NO_2)_3CH_3$］、三硝基酚（苦味酸）［$C_6H_2(NO_2)_3OH$］、三硝基苯甲硝胺（特屈尔）［$C_6H_2(NO_2)_4NCH_3$］、二硝基苯［$C_6H_4(NO_2)_2$］、环三次甲基三硝胺（黑索金）［$(CN_2N\text{-}NO_2)_3$］。

② 硝酸盐或硝酸酯，如甘油硝化物（硝化甘油）［$C_3H_5(ONO_2)_3$］、纤维素硝酸酯（纤维素）、季戊四醇四硝酸酯（泰安）［$C_5H_8(ONO_2)_4$］。

除上述各种单质的猛性炸药外，还广泛使用各种非单质的机械混合物炸药，例如：

① 硝铵炸药，是以硝酸铵为主的机械混合炸药。如80/20的阿梅托是80%的硝酸铵和20%的梯恩梯混合物；82/12/6的阿摩纳尔是82%的硝酸铵、12%的克西里尔和6%的铝粉的机械混合物。

② 代那梅特，如爆胶是88%～93%的硝化甘油和7%～12%的弱棉的混合物。

③ 液氧炸药，是浸以液氧的各种粉末状有机吸收剂。

3）火药。火药通常用于制作导火索、点火药和传火药等，它的爆炸速度和压力远小于猛性炸药，常见的有：

① 机械混合炸药，如黑色炸药是75%的硝酸钾、10%的硫和15%的碳的混合物。

② 胶体炸药，是用某些溶剂漆加胶化过的纤维素硝酸脂构成。如硝化棉炸药，是由95.7%的强棉、2%的醇醚溶剂、1%的二苯胺和1.3%的水分构成；巴利斯特炸药，是由59%的弱棉、20%～28%的硝化甘油、1%的安定剂和约10%的其他物质构成；无挥发溶剂炸药，是由68%的弱棉、25%的三硝基甲苯、5.5%的二硝基甲苯、0.5%的安定剂和1%的水分构成。

1.2 药包形状

爆炸成形常用的药包形状主要有球形、柱形、锥形及环形等（图7.5-2）。

球形药包在低药位情况下，对坯料作用的载荷不均匀，中央载荷大，边缘载荷小。因此零件顶部变薄严重。它只适用于成形较浅或厚度均匀性要求较低的球形零件。



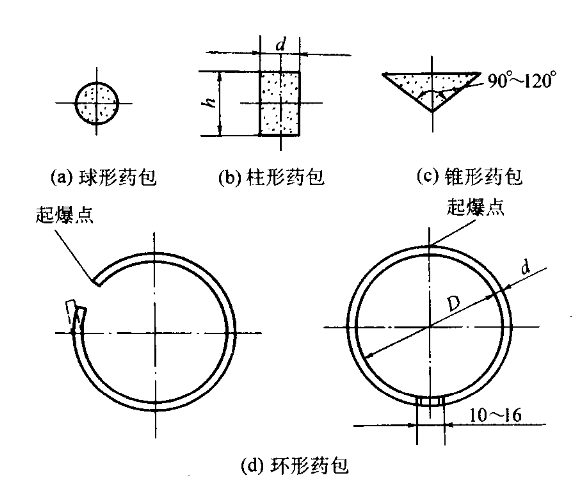


图 7.5-2　常用的药包形状

柱形药包可分为长柱和短柱药包两种。长柱药包由于端面和侧面冲击波相差太大，故不宜在爆炸拉深中使用，而多用于爆炸胀形。短柱药包（$h/d\approx1$）常用来代替球形药包。

锥形药包爆炸后顶部冲击波较弱，而两侧较强，因而利于拉深时法兰部分坯料的流入。所以常用于变薄量要求较严的椭球底封头零件成形。

环形药包主要用于大型封头零件成形。使用环形药包时，环形药包应在引爆端的对侧空出 10～16 mm 间隙不装药。空隙内可填纸或木塞，并在坯料对应处铺一层沙或橡胶，以防止该处因冲击波的汇合、局部载荷过大而引起坯料过度变薄甚至破裂。

药包形状决定其产生的冲击波波形，是保证爆炸成形顺利进行的重要因素之一，应根据成形零件变形过程所需要的冲击波阵面形状来决定。例如，一般拉深件可用球形或短柱形药包；大型拉深件或大尺寸球面的校形可用环形药包；长度大的圆柱体零件或管类零件的胀形或校形，可用长度与之相适应的长柱形药包或导爆索；大中型平面零件的校形或成形，可用平板形、网格形或环形药包等。图 7.5-3 为几种类型胀形零件采用的药包形状。

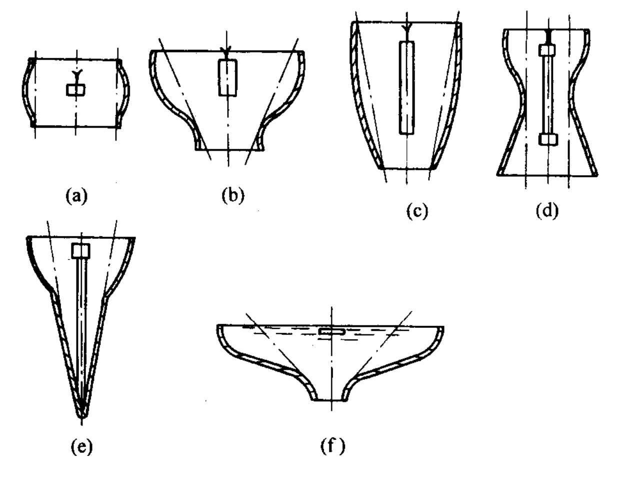


图 7.5-3　几种胀形零件的药包形状

爆炸速度与药包直径的关系如图 7.5-4 所示。直径小于临界直径 $d_{临}$ 时装药则不能爆炸；爆速随药包直径的增大而增加，当药包直径达到极限直径 $d_{极}$ 时爆速达到最大值。临界直径和极限直径随炸药成分、密度、颗粒大小、夹杂物等的不同而变化。表 7.5-1 为部分炸药临界直径的实验数据。

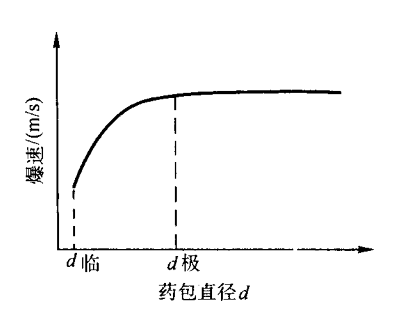


图 7.5-4　爆速与药包直径关系

表 7.5-1　临界直径

炸药名称	临界直径/mm
梯恩梯	8～10
苦味酸	5.5～9
黑索金	1～1.5
硝铵炸药 （21%梯恩梯，79%硝酸铵）	10～20
硝酸铵	100

注：装药密度：0.9～1.0 g/cm³；粒度 0.05～0.2 mm。

1.3　药位

药位是指炸药包中心与坯料表面之间的相对位置，其距离称为吊高。它与药形的正确配合，是获得所需冲击波阵面形状的保证。

对于轴对称零件，药包的形状也是轴对称的，其中心应与零件的对称轴线重合。对于球面零件，过低的药位将引起坯料中心处厚度变薄。对于筒状回转体胀形件，药包总是挂在回转轴上，并位于坯料变形量最大处，但应保证药包距水面有一定的距离。

药位的确定除与零件形状有关外，还与零件的材料性能及相对厚度有关。对于强度高而厚度又大的零件，药位可低些，反之应高一些。

生产中常用相对药位 h/D（吊高/凹模口直径）来确定药包位置，其选择范围如下：

球形、柱形、锥形药包　　$h/D=0.2\sim0.5$

环形药包　　$h/D=0.2\sim0.3$

对于强度高而相对厚度又大的零件，药位可取下限值；反之取上限值。

1.4　药量

目前，爆炸成形所需药量的理论计算方法还很不完善。通常都是根据经验对比的方法对药量进行初步估算，然后用逐步加大药量的方法最后决定合适的药量。

对于水中的球形药包，爆炸时产生的冲击波最大压力 P_{max}（MPa）、单位冲量 I（N·s/cm²）、单位能量 E（J/cm²）可按下列公式计算：

$$P_{max}=5.35\times10^{5}\left(\frac{\sqrt[3]{W}}{h}\right)^{1.13} \tag{7.5-1}$$

$$I=58.7\times10^{-2}\sqrt[3]{W}\left(\frac{\sqrt[3]{W}}{h}\right)^{0.89} \tag{7.5-2}$$

$$E=8.43\sqrt[3]{W}\left(\frac{\sqrt[3]{W}}{h}\right)^{2.05} \tag{7.5-3}$$

式中，W 为药量，kg；h 为吊高，m。

根据坯料的塑性变形功计算出所需要的单位冲量或单位能量，即可由上式确定装药量。但在实际应用中，各种成形工艺的变形功计算存在很大困难。因此，当前常用比较冲击波最大压力 P_{max} 和成形所需静压力 P 的间接方法做粗略计算，即：

$$P_{max} > KP \tag{7.5-4}$$

式中 K 是增大系数。对于变形量很小的校形，$K\approx3$；对于变形量不大的胀形，$K\approx5$；对于变形量较大的拉深工艺，可取 $K\geqslant10$。

根据各种工艺的变形特点、边界条件不同，在大量生产试验中，又总结出许多适合不同工艺的经验公式，其特点是使用方便，可供参考。

爆炸拉深时药量计算公式：

$$\frac{Y}{D} = K_1 K_2\left(\frac{W}{D^2 t}\right)^{0.78}\left(\frac{D}{h}\right)^{0.74} \tag{7.5-5}$$

式中，Y 为工件顶点处成形深度，mm；D 为凹模口直径，mm；W 为药量，g；t 为坯料厚度，mm；h 为吊高，mm；K_1、K_2 为系数。

在水介质中成形低碳钢封头类零件时，取系数 $K_1=120$。若采用砂介质时，取系数 $K_1=44.2$。系数 $K_2=\sigma_{S1}/\sigma_{S2}$，这里 σ_{S1} 和 σ_{S2} 分别是低碳钢与拉深零件材料的屈服强度。

爆炸胀形时药量计算公式：

$$W=\frac{\sigma_\theta \epsilon_\theta t_0 A_0}{q\eta} \tag{7.5-6}$$

式中，W 为药量，kg；σ_θ 为材料动载下的屈服强度，Pa，可近似取为静载屈服强度的 2 倍；ϵ_θ 为坯料切向的平均应变；t_0 为坯料初始厚度，m；A_0 为坯料初始面积，m^2；q 为单位药量潜能，J/kg，对于 TNT 炸药，$q=4.53\times10^6$ J/kg；η 为炸药能量利用率，可取 13%～15%。

1.5 传压介质

爆炸成形时传递压力的介质常用的有水、空气和砂等。空气中的爆炸成形工艺简单，不需要特殊装置，成本低，但噪声和振动大，污染环境，而且易损伤坯料表面。用水为介质时，因压缩性比空气小，传压效率高，所需炸药量可大幅度减少，而且水的阻尼作用可减少振动和噪声，又能保护坯料表面不受损伤，因而生产中应用较多。但用水为传压介质时，爆炸装置比较复杂，而且爆炸时水的飞溅给生产带来一定麻烦。在用水有困难时，也可用砂为传压介质。用砂为介质时，不需要容框，不需要密封，装置更加简单，但传压效率及成形工件的质量不如水。

1.6 水深

水深是指炸药包中心至水面的距离。它影响到冲击波对坯料作用能量的分配。水深越大，则冲击波作用到坯料的能量也越大，水深小，则冲击波作用到坯料的能量也小。但当水深超过某一极限值后爆炸效果基本不变。在拉深时，临界水深一般可取为（1/3～1/2）D，D 为凹模口直径。

2 爆炸成形装置与模具设计

爆炸成形工装主要包括模具和传压介质的盛装、密封装置及抽真空装置等。

2.1 传压介质的盛装装置

如果传压介质用水，则用护筒盛水，如图 7.5-1 所示。护筒可用 20～30 mm 的厚钢板焊接而成。钢板护筒可以利用筒壁的正压反射波提高成形效果，但成本较高，使用寿命也不太长。尤其对于形状不规则或者多品种、小批量工件的生产，使用钢板护筒既不方便，也不经济。此时，可以用塑料布或沥青纸制成护筒（如图 7.5-5）。

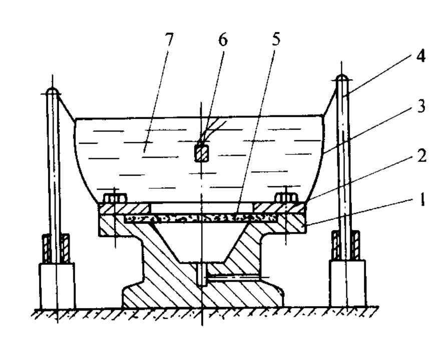


图 7.5-5　塑料袋爆炸装置

1—凹模；2—压边圈；3—塑料袋；4—支架；5—坯料；6—药包；7—水

爆炸井通用性大，操作方便，可以利用井壁的正压反射波提高成形效率。通常采用圆形、方形水井，钢板焊成的内壳置于钢筋混凝土的外壳内。为了减轻井壁负荷，可以在钢板的内壳表面设置一层软橡胶或压缩空气泡组成的气幕，也有采用沥青夹层或多层筒圈吸收能量减轻井壁负荷的。各种爆炸井的结构如图 7.5-6 所示。

如果传压介质用砂，则可用砂坑（如图 7.5-7）或地面护墙式（如图 7.5-8）爆炸装置。

2.2 爆炸成形用模具

除了球形空心零件爆炸胀形可不用模具外，爆炸成形工艺多数采用单模（其中又以凹模居多）。凹模可分为无底凹模与有底凹模两种。图 7.5-9a 为无底凹模爆炸拉深装置。该装置结构简单，但零件外形主要靠控制工艺参数保证，因此零件精度低，只适于形状简单，精度要求又不高的零件。

有底凹模又可分为抽真空和自然排气两种。图 8.5-9c 为抽真空有底凹模爆炸拉深装置，通常用于变形量较大、形状较复杂的零件，此时模腔内空气不易排出而影响贴模，必须在成形前用真空泵将模腔内空气抽出。一般，模腔内的真空度应保持在 665～1 330 Pa。抽真空的模腔必须采取密封措施。小批量生产时，可用简易密封方法，如用黏土与油脂的混合物等。批量较大时，宜用密封圈结构，大多数情况下可用 O 形密封圈。

自然排气的有底凹模主要用于变形量很小的校形工艺、浅拉深、多次成形的形状不规则零件、黑色金属及厚铝板零件。图 7.5-9b 为自然排气有底凹模爆炸拉深装置。在保证模具强度情况下，可尽量多设排气孔。排气孔应设在坯料最后贴模部位。不连通的模腔应分别设置排气孔。图 7.5-10 为自然排气爆炸胀形装置。图 7.5-10a 为自由界面自然排气结构。该装置中，水界面与坯料端面平齐，坯料端面为自由界面。由于自由界面附近冲击波受到很大削弱，效率低，零件上口贴模不好，因此实际应用较少。图 7.5-10b 为加水帽的自然排气结构。由于水帽使水自由界面远离坯料端部，因此提高了炸药的能量利用率，同时利于零件上口部的贴模。水帽一般用 2～3 层沥青纸制造。对于直径小于 300 mm 的零件，水帽高度应为 100～200 mm；对于直径为 300～600 mm 的零件，水帽高度可取为 200～350 mm。图 7.5-10c 为反射板自然排气结构。反射板为一金属板，与坯料上端保持一定间隙，其大小靠木块调整。反射板结构可克服自由界面结构的坯料上端贴模不好及水帽结构的憋气现象等缺点。

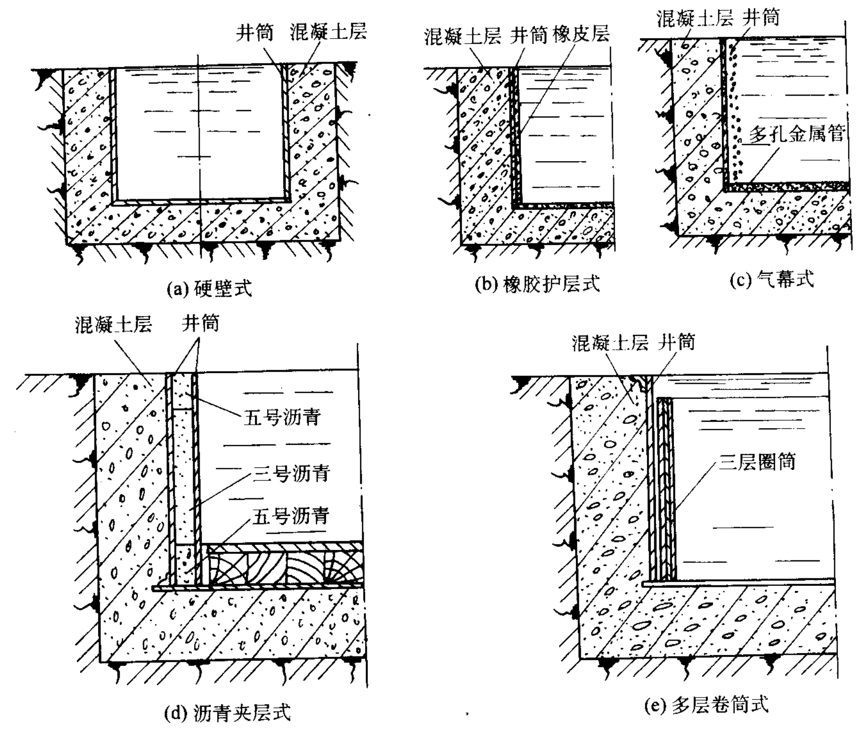


图 7.5-6 爆炸成形用水井

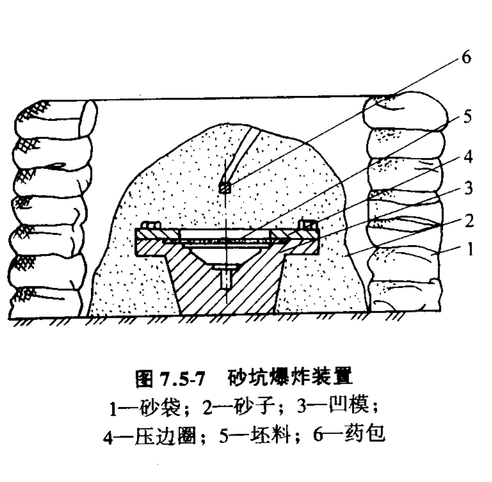


图 7.5-7 砂坑爆炸装置

1—砂袋；2—砂子；3—凹模；4—压边圈；5—坯料；6—药包

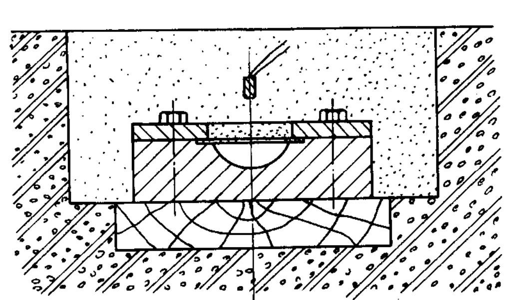


图 7.5-8 地面护墙爆炸装置

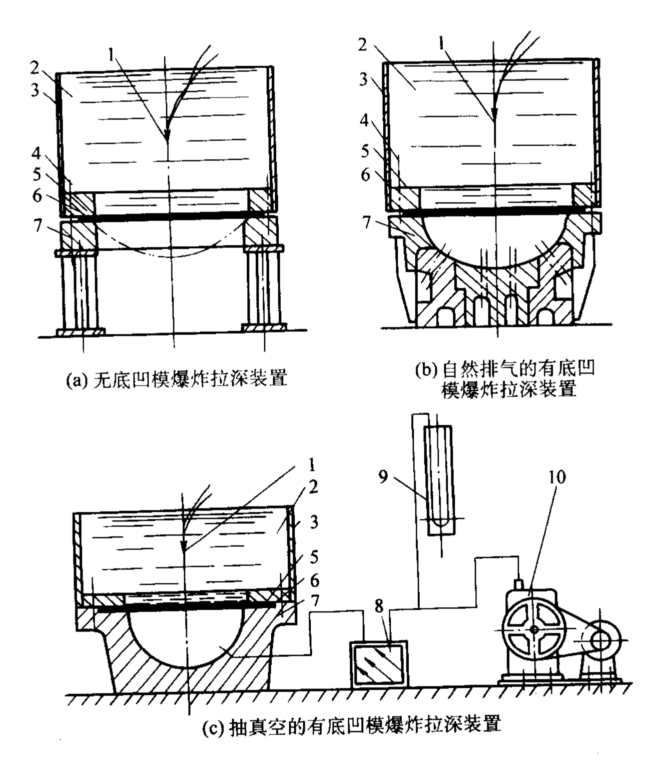


图 7.5-9 爆炸拉深装置

1—药包；2—水；3—水筒；4—压边螺栓；5—压边圈；6—坯料；7—凹模；8—过滤器；9—真空计；10—真空泵

爆炸成形模具所用材料，取决于成形零件的几何形状、尺寸大小及精度要求，材料的力学性能及厚度，药量大小和生产批量等因素。零件形状复杂、生产批量较大时，常用合金钢（模具钢或工具钢）。在批量较小而且零件厚度不大时，也可使用铸铁、锌合金及非金属等材料。几种爆炸成形模具材料的特点和使用条件见表 7.5-2。

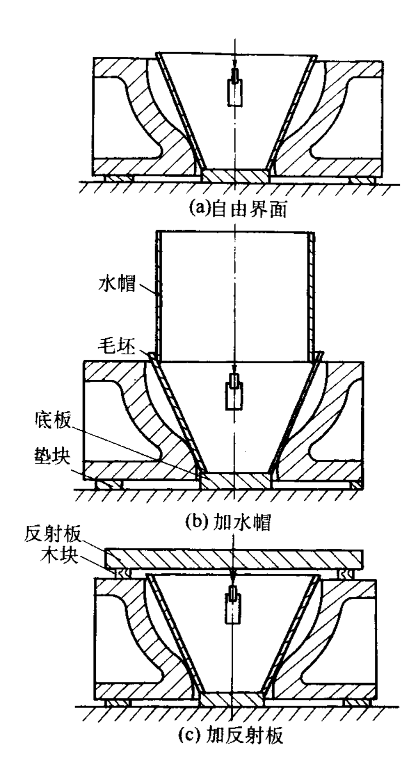


图 7.5-10　自然排气爆炸胀形装置

3　工艺分析与实例

爆炸成形虽然可以完成多种冲压工序，但最常见的、应用最多的是拉深和胀形工序。下面重点分析这两种爆炸成形工序。

3.1　爆炸拉深

3.1.1　爆炸拉深模具结构

爆炸拉深模具由凹模和压边机构两部分组成。

(1) 凹模

爆炸拉深凹模可分为自然排气凹模、抽真空凹模、焊接凹模、惯性凹模、无底凹模等形式。

图 7.5-11 为自然排气凹模，其特点是在模体上开许多小孔，在坯料高速贴模过程中，模腔内的空气由小孔排出。模体上开许多小孔，大大削弱了模具强度，所以炸药量不能过大，并要求准确地控制爆炸参数，否则在零件上会印出小孔痕迹，甚至会冲孔。此外，它不能放入水井中，只能在地面上加水帽来成形零件。

抽真空凹模一般只开一个抽气孔。为了减轻零件表面压痕，应尽量减小孔径，并将孔开在零件最后贴模的部位，此部位也应该是受力最小的部位。

对于大型模具，由于制造困难，可将整体模具分成几块，然后焊接成一个整体。图 7.5-12 为生产 ϕ1 400、厚度 5 mm 的不锈钢封头所采用的组合焊接自然排气爆炸拉深凹模。

表 7.5-2　几种常用爆炸成形模具材料的对比

材料种类	寿命	精度	成本	用　途
锻钢	高	好	高	形状复杂、精度要求高、材料厚度大、强度高而尺寸不大的零件拉深模、胀形模、校形模等，生产批量较大
铸钢	高	较好	较高	大型成形模、生产批量较大
铸铁	一般	较好	一般	一般条件
锌合金	一般	较好	较低	厚度较小、精度要求不严的零件成形模
水泥基体 + 钢板被覆	较低	低	低	大尺寸低强度零件成形模、生产批量小或试生产
水泥基体 + 环氧树脂被覆				

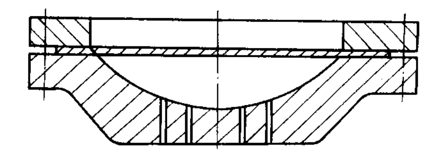


图 7.5-11　自然排气凹模

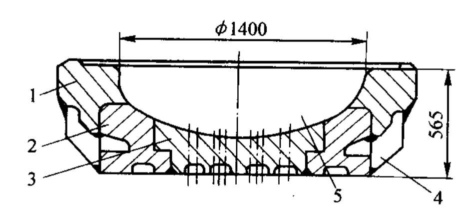


图 7.5-12　组合焊接凹模
1—上环；2—中环；3—下环；4—肋板；5—排气孔

爆炸拉深时，如果爆炸工艺参数的计算与试验准确，坯料贴模时动能已耗尽，传递给模具的力并不大，这种情况下，组合模具也可以不焊成整体，甚至可以用冰来制造凹模，此时依靠凹模块或冰模散开来吸收剩余的能量。这就是所谓的惯性凹模。图 7.5-13 就是惯性凹模的一种。它用于制造 ϕ2 607 mm、厚为 28 mm、深为 793 mm 的合金钢封头。该模具由压边圈、拉深环、模壁、模底及底盘五部分组成，全部用 ZG45 铸造，总质量约 30 t。

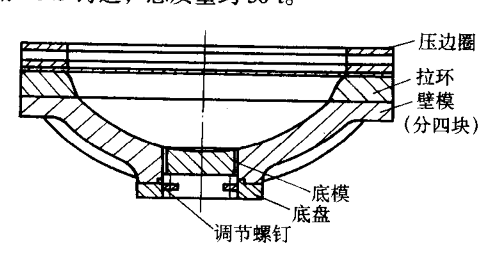


图 7.5-13　惯性凹模

图 7.5-9a 中零件 7 为无底凹模，由于省略了型面部分，模具重量大为减轻，制造、运输、起吊也容易得多。但零件形状须靠调整爆炸工艺参数来保证，精度较低。这种结构主要用于大型封头零件的成形，也可用于探索爆炸参数的试验用模。

凹模的圆角半径 R_M 应根据材料厚度和成形深浅以及对变薄量的要求确定。R_M 过大，易引起内皱和严重的圆角脱



离，但变薄量小；R_M 过小则反之。表 7.5-3 列出的 R_M 值仅供设计无凸缘零件的爆炸拉深模时参考。

表 7.5-3　凹模圆角半径与坯料相对厚度的关系

板料	坯料相对厚度 $t/D \times 100\%$	
	1%以下	1%以上
钢板	(6～10) t	(6～8) t
铝合金板	(6～8) t	(5～6) t

(2) 压边机构

爆炸拉深压边的作用是：

① 控制凸缘材料的流动；

② 防止或限制凸缘坯料起皱；

③ 保证模腔密封。

1) 压边形式。常见的压边形式有惯性压边和螺栓压边两种。

① 惯性压边。惯性压边就是将一定质量的压边圈自由地放在坯料上（见图 7.5-14），利用压边圈的质量和作用在它上面的冲击波和介质动压来达到压边的目的。其特点是结构简单，操作方便，生产效率较高。当坯料材质、相对厚度、尺寸大小以及炸药参数和其他边界条件一定时，压边力大小取决于压边圈的质量。根据经验，压边圈的质量应大于坯料质量的 10 倍以上。对于起皱趋势严重的零件，如相对厚度小或拉深深度大的零件，惯性力显得不足，故此法仅适用于厚板或浅的拉深件。

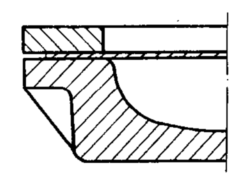


图 7.5-14　惯性压边

② 螺栓压边。用螺栓将压边圈与凹模连成一个整体，依靠拧紧螺栓产生一定的压边力，这是爆炸拉深最常见的压边形式。螺栓压边又分为定间隙压边和直接压边两种。

a) 定间隙压边。定间隙，即压边圈与坯料不直接接触，留有一定的间隙，以减小坯料流动的摩擦力，从而减小零件的变薄量。它一般用于成形深度较大、变薄量要求较严的拉深件。在模具端面加工出台阶或用加垫片的方法来保证一定的间隙（见图 7.5-15）。间隙值的大小一般为材料厚度的 1.05～1.15 倍。

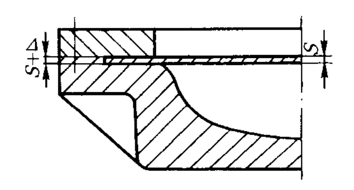


图 7.5-15　定间隙压边

b) 直接压边。压边圈直接压在坯料上，压边力大小一般使用扭力扳手依靠螺栓拧紧程度来调节。有时为了防止冲击波和介质动压对螺栓头的破坏，可将螺母放在模具的下方（见图 7.5-16）。

当成形大尺寸高强度拉深件时，往往使用很大的炸药量，如果模具和压边圈上开了螺栓孔，会因断面积减小和引起应力集中而破裂，此时可采用图 7.5-17 所示的结构。

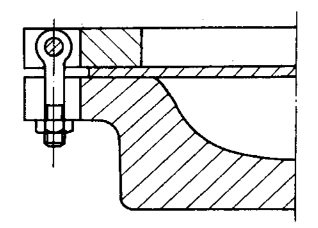


图 7.5-16　螺母朝下的直接压边

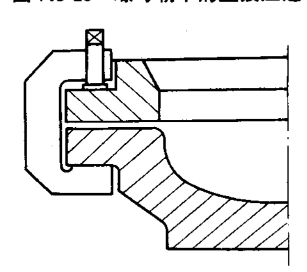


图 7.5-17　卡箍式压边机构

2) 压边圈的结构设计。常见的压边圈结构有平板式、带加强筋及焊接结构等三种。

对于中小型、压边力要求不大的拉深件，可用平板式压边圈。其结构简单，制造方便。如须加大刚度，必须增大厚度。但对于大型压边圈来说，造成材料浪费，因此多用带加强筋结构。

图 7.5-18 为带加强筋的压边圈，无论在刚度或质量方面都比平板式优越。尺寸较大时可用铸钢件。对于大型、形状复杂的压边圈，铸造很困难，可采用钢板焊接结构。图 7.5-19 为一种大型焊接结构压边圈，它是在厚钢板上焊四根槽钢和二十四条加强筋板构成的。螺栓直径为 ϕ40 mm，外形长 5 m、宽 1.6 m。由于焊接时容易产生变形，因此焊后必须进行时效处理，然后对其与坯料接触的平面进行加工。

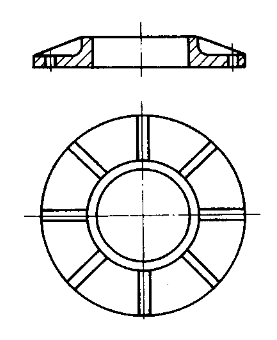


图 7.5-18　带加强筋压边圈

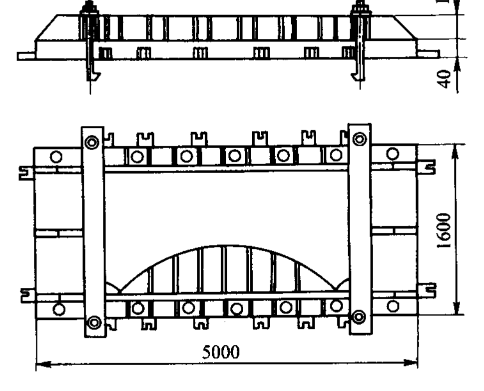


图 7.5-19　大型焊接结构压边圈



压边圈外径　$D=D_0+2d+2B+2C$　(7.5-7)

式中，D_0 为坯料直径；d 为螺栓孔直径；B 为螺栓孔之外边距；C 为坯料与螺栓间的间隙。

压边圈内径 D_m 应视具体情况而定。拉深深度较大的零件，为了减少变薄量，常采用较小的内径，即与凹模口内径 D_n 相同，但它对凹模圆角处坯料的校形不利。若取 $D_m=D_n+2R_m$，则其利弊与上述相反，R_m 为凹模的圆角半径。

3.1.2　爆炸拉深零件的质量

爆炸拉深零件的质量评价从零件精度、表面质量、壁厚变薄、起皱等方面考虑。

(1) 零件精度

爆炸成形零件的精度主要表现为型面尺寸对图样的误差。对于有底凹模爆炸拉深，其工件的精度取决于坯料性能、模具的材料与加工误差、模腔真空度、贴模速度、工件形状等。

不同材质的坯料具有不同的弹性模量、屈服强度与硬化指数，因此其承载时的贴模性能和卸载时的回弹大小也不相同。贴模性能好、回弹小的材料，其制品精度也高。

模具的弹性变形过大会降低工件的精度，但是模具本身的适当弹性变形又可以补偿工件卸载的弹复，有利于提高制品精度。

坯料高速贴模，可产生惯性辗压效应，减小回弹，这是爆炸拉深件精度比常规冷冲压高的重要原因。因此适当增大药量或降低药位，可增大坯料贴模速度，从而提高制品精度。

通常，工件形状变化急剧处（如转角 R 处），比光滑曲面处的精度要低一些。这是由于该处坯料受到近邻坯料的制约，变形速度较低的缘故。为了解决这一类零件的精度，可采用第二次校形的方法，针对那些精度不高的部位，再进行爆炸校形，即可得到精度较高的工件。

(2) 表面质量

爆炸拉深件常见的表面缺陷有：

内表面斑点和击伤：硬度较低的有色金属材料爆炸拉深时较常见，这是由于以水为介质的爆炸拉深，往往在坯料表面有气泡，当冲击波作用时，压缩气泡内气体产生较高的压力，可能击伤坯料表面。雷管皮或炸药金属外壳的碎片高速撞击到坯料上，也会产生麻点。克服这种缺陷的办法是，将坯料表面擦洗干净，然后涂以黄油，或在内表面贴橡皮或塑料布，以保护表面，免受击伤。

外表面擦伤或划痕：这是由于爆炸拉深时金属流动和贴模速度很快，当凹模口或型腔表面粗糙度较低时，就会在坯料外表面留下划痕或印痕。因此，要求凹模型腔表面粗糙度为 $R_a1.6\sim0.8\ \mu m$，且在凹模口处涂以润滑油。适当提高模具工作表面硬度，减少模具磨损，也可改善工件划痕。

过低的药位、过大的药量会使坯料局部变薄严重，使金属的晶间产生畸变，从而出现一圈凸凹不平的桔皮状斑痕。

(3) 壁厚变薄

爆炸拉深时，工件的某些部位承受两向拉应力，致使其厚度减薄、面积增大，这是不可避免的现象。但是可以通过合理调整工艺参数来控制变薄量。例如采用高药位、锥形或环形药包、减小压边力、增大凹模圆角、增大拉深系数等，均可减小径向拉应力，从而减小壁厚的变薄。

为了减轻拉深件壁厚的变薄，可以在坯料的中部垫放金属、非金属板块或者砂袋、砂堆，使坯料中部质量增大，降低其变形速度，从而减小变薄。对于中小型拉深件，也可以采用锥形控制板法调整坯料上的载荷分布（图 7.5-20），减轻中部的变薄。

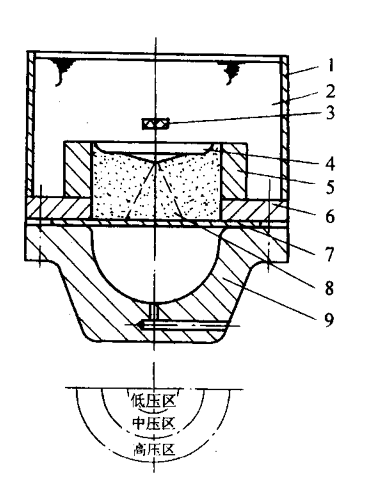


图 7.5-20　锥形控制板法

1—护筒；2—水；3—药包；4—锥形控制板；5—导向环；6—压边圈；7—坯料；8—细砂；9—凹模

(4) 起皱

爆炸拉深与普通拉深一样，凸缘及凹模口处材料承受着径向拉应力和切向压应力。当切向压应力大于坯料的临界失稳应力时，便会产生皱褶。因此，所有可以增大径向拉应力和减小切向压应力的措施，如加大压边力、设置拉深筋、减小拉深系数，减小凹模圆角半径、采用小药量多次成形等，均可有效防止起皱。

3.1.3　常见的爆炸拉深工艺参数与工艺实例

常见的爆炸拉深工艺参数与工艺实例见表 7.5-4、表 7.5-5、表 7.5-6。

表 7.5-4　封头自由拉深

封头直径/mm	200	416	624	822	1 000	1 680
材料	Q235	Q235	Q235	Q235	20	20
坯料直径/mm	Φ250	Φ537	Φ815	Φ1 050	Φ1 285	Φ2 340
坯料厚度/mm	3	8	12	14	14	40
药量/kg	0.02	0.225	0.75	1.41	2	16
药位/mm	40	83	120	165	206	320
水深/mm	140	210	320	420	720	960

表 7.5-5 大型椭球封头有底凹模自然排气拉深

封头尺寸/mm	材料	爆炸工艺参数				拉深深度/mm
		药量/kg	水深/mm	药位/mm	药形（TNT，$\gamma \approx 1$）	
ϕ1 210×5	1Cr18Ni9Ti	0.5	550	300	120°～140°锥形	300
ϕ1 410×5	1Cr18Ni9Ti	0.65/0.35		300		280/340
ϕ1 210×8	1035-O	0.3		320		300
ϕ1 448×8	5A03-O	0.5		320		300
ϕ1 448×15	C25	2		320		300
ϕ1 470×10	5A03-O	0.5		320		310
ϕ1 470×8	1Cr18Ni9Ti	0.8/0.45		320		310
ϕ1 828×10	1060-O	0.8		320		
ϕ1 828×14	1060-O	0.8		320		450

表 7.5-6 各种典型零件爆炸拉深工艺参数

序号		(1)	(2)
零件简图及技术要求		ϕ650 R80 170 型面按样板 1. 直径容差0.3mm； 2. 型面容差1mm。	$\phi 756^{+2.5}_{0}$ 22 215
材料牌号		5A06-O	25CrMnSiA
坯料尺寸/mm			
成形装置			ϕ1800 砂环 206
药包参数	炸药种类	TNT	TNT
	药形	扁柱形（ϕ75）	90°～120°锥体
	药位/mm	420	206
	药量/g	200	1 600
真空度/Pa		400	
零件质量		直径偏差 0.1～0.3 型面偏差 < 1 最大变薄量 10%	
出现问题及解决措施			



续表 7.5-6

序号	(3)	(4)
零件简图及技术要求	1.允许变薄至0.55mm 2.外形容差1mm	
材料牌号	1035-O	2A12-O
坯料尺寸/mm	ϕ530×1	ϕ230×1.5
成形装置		
药包参数 炸药种类	TNT	TNT
药包参数 药形	120°锥体	短柱形
药包参数 药位/mm	105	成形：120；校形：90
药包参数 药量/g	5.5	成形：15；校形：10
真空度/Pa	66.7	667
零件质量	样板间隙<0.36；直径偏差<0.42；椭圆度为0.42；最大变薄21%	成形良好
出现问题及解决措施	未加砂堆前，变薄量超差，且零件与抽气孔对应处冲孔；堆砂后上述缺陷解决	
序号	(5)	(6)
零件简图及技术要求		

续表 7.5-6

序号		(5)	(6)
材料牌号		2A12C　2A12-O	Q235
坯料尺寸/mm		ϕ362	ϕ265×5，8，10
成形装置			
药包参数	炸药种类	TNT	TNT
	药形	短柱形	90°锥形
	药位/mm	M 料为 198；C 料为 195	155
	药量/g	M 料为 23；C 料为 32	$\delta=5$ 时为 300 g；$\delta=8$ 时为 460 g；$\delta=10$ 时为 570 g
真空度/Pa		667	1 333～2 666
零件质量			贴模良好
出现问题及解决措施		因真空度低产生反凸，提高真空度则可解决	采用铸铁模具易开裂，宜用锻钢模具

3.2　爆炸胀形

爆炸胀形常用于生产大型筒状回转体零件，其典型零件如图 7.5-21 所示。爆炸胀形与液压胀形、橡皮胀形、旋压等常规冲压工艺相比，具有不需复杂设备、模具简单、成形精度高、成形次数少等特点，是爆炸成形常用工艺之一。

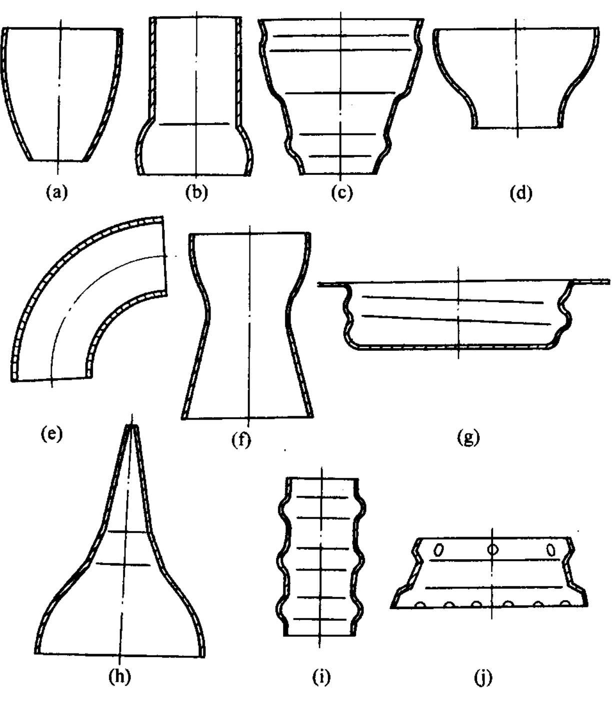


图 7.5-21　典型爆炸胀形零件

(1) 爆炸胀形模具结构

对于一端大一端小的胀形零件，可采用整体模具（见图 7.5-22）。对于两端大中间小或两端小中间大的胀形零件，为了能取出工件，必须采用可分凹模。受力较小的可分凹模可用螺栓锁紧（见图 7.5-23），受力较大的可分凹模，因螺栓

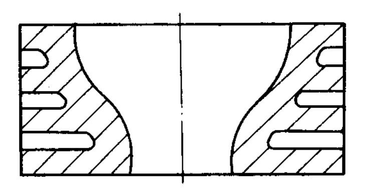


图 7.5-22　整体胀形模具

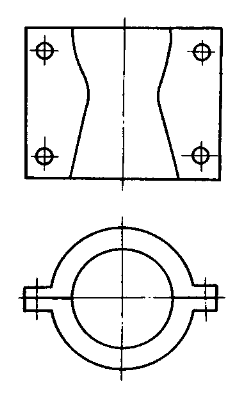


图 7.5-23　螺栓锁紧胀形模



强度不够，可改用镶套式胀形模（见图 7.5-24）。采用镶套式胀形模时，模芯与模套以 3°～5°的锥度配合，配合面积不小于 70%，配合面表面粗糙度应在 R_a1.6 以下。由于胀形模所受载荷比拉深模大得多，因此要特别重视其强度问题。

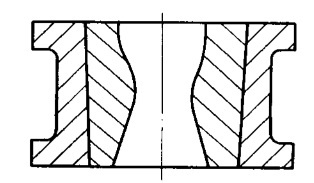


图 7.5-24　镶套式胀形模

（2）胀形坯料

小型胀形零件常用有缝或无缝钢管作为坯料，大型零件坯料则用平板滚卷后焊接而成。焊接方法以自动氩弧焊时质量较佳，气焊、电弧焊等较差。焊接后要进行退火，以消除内应力，并增加材料的塑性。在设计胀形坯料时，应注意以下一些问题：

1）坯料端部外径应比模口直径小一定数值，以满足排气要求。根据实践经验，直径为 200 mm 左右的零件，一般应小 2～3 mm；直径为 500 mm 左右的零件，一般应小 8～12 mm。

2）胀形时坯料母线通常都要缩短，因此，坯料高度应加放适当的余量。

3）坯料最大变形处的圆周方向伸长率应控制在动载下的材料极限伸长率之内，即

$$\delta_0 = \frac{D - D_0}{D_0} \leqslant \delta_d \tag{7.5-8}$$

式中，D_0 为最大变形处坯料的初始直径；D 为最大变形处胀形后零件的直径；δ_0 为最大变形处坯料的圆周方向伸长率；δ_d 为动载下的材料极限伸长率。

表 7.5-7 列出几种材料焊缝区在动载下的极限伸长率经验值，可供参考。

表 7.5-7　δ_d 的经验数据

材料	状态	δ_d/%
1Cr18Ni9Ti	1 级自动氩弧焊，厚度为 0.5～3 mm 冷轧板	约 40
08F	1 级自动氩弧焊，焊后退火，厚度为 0.5～3 mm 冷轧板	约 20
5A03-O	1 级自动氩弧焊，厚度为 0.5～3 mm	约 20

4）胀形坯料变形后的厚度应在零件允许范围内，即：

$$T = \frac{D_0 T_0}{D} \geqslant T_1 \tag{7.5-9}$$

式中，T 为胀形后零件的厚度；T_0 为坯料初始厚度；T_1 为零件允许的最小厚度；D_0 为最大变形处坯料的初始直径；D 为最大变形处胀形后零件的直径。

（3）几种典型零件爆炸胀形工艺参数（见表 7.5-8）。

表 7.5-8　典型零件爆炸胀形工艺参数

序号	1	2	3	4	5
零件简图	ϕ440, 900, ϕ230, ①, ②	ϕ139, 494, ϕ153.3(球)	ϕ300, 350, ϕ200	ϕ200, 100, ϕ120	ϕ180, 187, ϕ179, ①, ②
材料	3A21-O 厚 1.5 mm	1Cr18Ni9Ti	10F 厚 1.5 mm	1Cr18Ni9Ti 厚 1.0 mm	08F 厚 0.8 mm
成形次数	2	2	1	1	2
药量(TNT)/g	① 5 ② 10	① 2.5 ② 2	25～35	10～15	① 3.3 ② 3.1
药位/mm	① 距大端 600 ② 距大端 160	① 球心偏下 10 ② 球心	距底面 120	距底面 40	① 距上端 21 ② 距上端 156
药形	ϕ6 细长药柱	① ϕ14 短柱 ② ϕ14 短柱	ϕ20 长柱	ϕ16 柱形	等柱形
密度	压装 1.4	压装 1.4	1.1～1.2	1.1～1.2	粉装 1
真空度	自然排气	自然排气	自然排气	自然排气	自然排气
介质	水 （灌满坯料）	水 （离药 120 mm）	水 （水帽高 280 mm 刚性底板）	水 （水帽高 180 mm，刚性底板）	水 （水帽高 100 mm 刚性底板）



续表 7.5-8

序号	6	7	8	9	10
零件简图					
材料	5A03-O 厚 1.2 mm	1Cr18Ni9Ti 厚 2.0 mm	1Cr18Ni9Ti 厚 1.5 mm	1Cr18Ni9Ti 厚 0.6 mm	1Cr18Ni9Ti 厚 2.0 mm
成形次数	1	1	3	3	1
药量(TNT)/g	14	70	导爆索 第一次长 465 第二次长 300 第三次长 510	导爆索 第一次 ϕ500 长 3 170 第二次 ϕ700 长 2 200 第三次 ϕ700 长 2 200	导爆索 图示
药位/mm	零件中心	药包上端距零件上端 50	零件中心线	第一次 $H=280$ 第二、三次 $H=320$	图示
药形	等柱形	ϕ19 柱形	弧形导爆索	环形导爆索	直线
密度	粉装 1	粉装 1			
真空度/Pa	0~64	0~400	自然排气	自然排气	自然排气
介质	水 (水帽高 200 mm)	水 (水帽高 350 mm)	水 (灌满坯料)	水 (水帽高 600~900 mm)	水

3.3 其他形式的爆炸成形

(1) 爆炸无模成形

对于某些大型而精度要求不高的薄壳零件，采用爆炸无模成形工艺，可以节省大量模具费用，缩短生产周期。此时零件的形状和尺寸主要靠坯料形状和爆炸工艺参数来控制。生产中比较成功的事例有两类：球形容器和大型封头。

1) 球形容器爆炸无模成形。该方法分别用 4 锥、5 锥及 6 锥结构焊接成内接于球的容器。然后在容器内注满水，并将球形药包置于结构中心（图 7.5-25)。炸药爆炸时，结构被胀成球形。模拟试验结果表明，4 锥、5 锥及 6 锥结构均可胀成球形，但由于 5 锥结构在焊接区域应变最小，因此是最理想的结构。

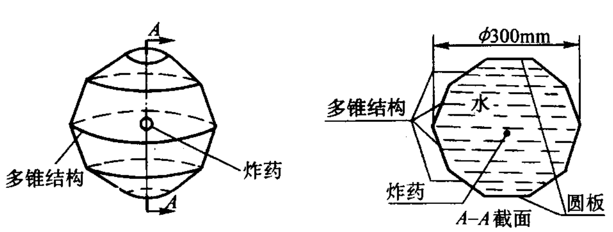


图 7.5-25 球形件成形原理

球形容器无模胀形的炸药量可按下式计算：

$$W=\frac{4KR^2\delta}{\eta_2\eta_1 e} \qquad (7.5\text{-}10)$$

式中，R 为球形容器半径，mm；δ 为板料厚度，mm；K 为与材料、壳体结构及变形程度有关的系数，当材料及壳体结构给定时为常数；η_2 为壳体相对药包几何关系决定的能量传递效率，对于球壳 $\eta_2=1$；η_1 为传压介质能量传递效率，水中爆炸 $\eta_1=0.55$；e 为炸药比能；W 为炸药包质量，g。

2) 大型封头。大型封头无模爆炸成形装置如图 7.5-26 所示。用砂作为传压介质并支撑板料。对砂坑的基本要求是：要有尽可能大的容积和足够的支反力。因此，常采用 $\theta=100°$的自然堆，砂坑直径取板料直径的 1.5~2.0 倍。当板

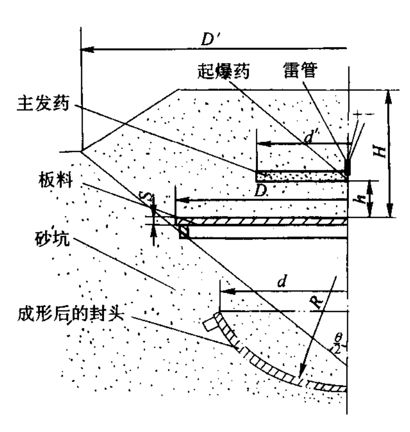


图 7.5-26 封头无模爆炸成形装置



料周边因切向刚度不够而起皱时，可加防皱圈解决。在成形过程中，防皱圈绕其中心翻转，有被拉平的趋势（图7.5-27），由此对板料周边产生切向拉应力，有效地防止起皱。

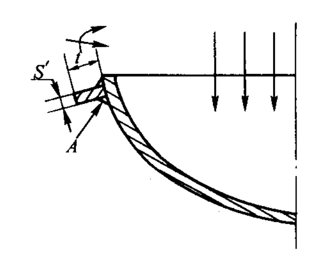


图7.5-27　防皱圈对封头成形的影响

（2）爆炸校形

爆炸校形常与常规冲压工艺联合使用，由常规冲压工艺提供半成品，用爆炸校形工序来保证产品的精度。这样既能提高生产效率，又能使零件获得很高的精度。如图7.5-28所示的导轨零件，未注圆角半径均为$R2$ mm，用厚1.5 mm的2Cr13Ni4Mn9不锈钢板制成。由于该零件沟槽较深，而圆角半径又小，故采用常规冲压工艺时容易破裂，精度也达不到要求。同理，也难以实现直接由平板料进行爆炸成形。较佳方案是：将平板料在冲床上压出15 mm左右深的沟槽，然后进行一次爆炸加深，最后进行一次爆炸校形。

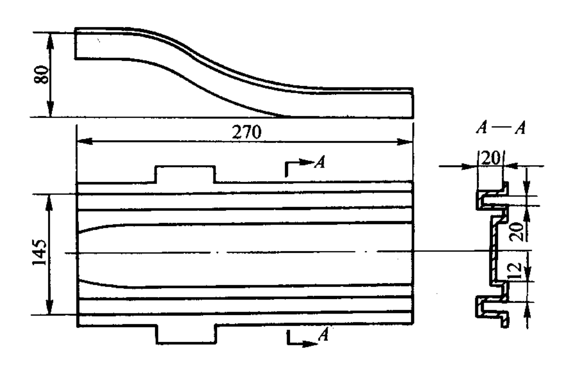


图7.5-28　导轨零件

爆炸加深和爆炸校形均采用塑料袋盛水的地面爆炸，不必密封，两道工序参数相同：药包为$\phi30$的长柱形，药量为140 g TNT，药位120 mm（在零件对称轴线上），水深250 mm。两道工序用同一凹模，只不过在爆炸加深时，在模具顶部与零件之间以及模具凹模底各垫一层1.5 mm的橡皮，以防零件破裂。

（3）爆炸冲孔

爆炸冲孔具有下列优点。

1）板料尺寸不受机床限制，可以在大板料中间开孔。

2）不需凸模，便于冲制特殊形状的孔，特别适用于冲制零件曲面部位上的型孔。

3）可保证孔与孔之间或孔与外形间的相对位置准确。

4）可对厚而硬的合金钢板上的孔进行粗加工。

5）冲出的孔径和厚度比可以很小，例如可在1.2 mm厚的20钢板上冲出$\phi1$的小孔，这是冲床所难以达到的。

爆炸冲孔也存在一些缺点：精度较差、孔上表面有一个圆角区。

用图7.5-29所示的装置可以在厚度为4 mm的3 000 mm×1 200 mm低碳钢板上冲出$\phi100$ mm的圆孔，药量为100克压装TNT，药柱直径$\phi50$ mm，水深800 mm，沥青护筒直径$\phi140$ mm，周围用玻璃胶密封，以防漏水。操作简单方便，孔的质量及尺寸均符合要求。

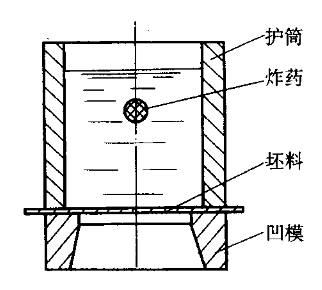


图7.5-29　爆炸冲孔装置

（4）板状零件爆炸成形

带有半圆弧形筋或波纹的大型板状零件，如用常规冲压方法加工，需要大台面压力机和大型模具，造成生产成本过高，或不具备生产条件。这时采用爆炸成形方法是最佳选择。

如图7.5-30所示的大型底板，分左右两块，压筋后焊接而成。生产方法如下。

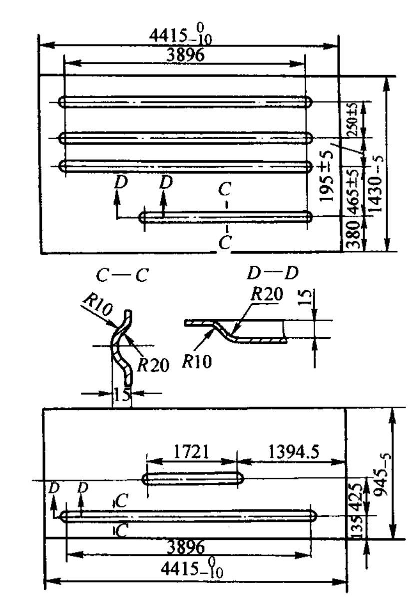


图7.5-30　大型底板

1）坯料：材料Q235，尺寸4 410 mm×1 430 mm×6 mm和4 410 mm×945 mm×6 mm两种。

2）模具：带分块压板的整体铸钢模，材料ZG35，厚200 mm。

3）介质：两次成形，预成形用砂，成形用水，均系放在地面上爆炸，盛水容器为塑料袋。成形装置如图7.5-31所示。

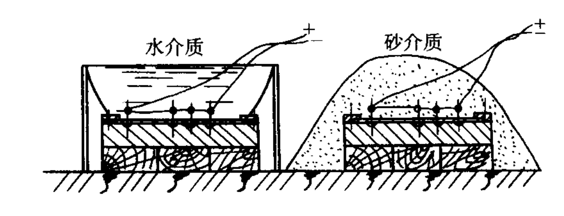


图7.5-31　大型底板爆炸装置

4）成形参数如表7.5-9。

（5）爆炸强化

对于某些奥氏体钢，经奥氏体化处理后，其屈服强度$\sigma_{0.2}$较低，不能满足使用要求，但可以通过冷变形来提高其强度。较典型的事例是发电机护环，通常采用50Mn18Cr4奥



表 7.5-9 大型底板爆炸成形参数

工序名称	介质				炸药参数					成形深度/mm
	名称	湿度/%	粒度/%	堆高/mm	药种	药量/g·cm^{-1}	药管内径/mm	密度	粒度	
预成形	河砂	22.6	82.3	400	TNT	1.26 1.76	Φ12 Φ14	1.13	≤0.3	11～12 15～16
成形	水			200	TNT	1.76	Φ14	1.13	≤0.3	15～16

氏体型无磁钢制造。这种钢经奥氏体化处理后，其屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 在 400 MPa 以下，不能满足使用要求（要求 $\sigma_{0.2}$ 大于 750 MPa），这时可以采用爆炸强化的方法来提高其强度。护环爆炸用的装置如图 7.5-32 所示。

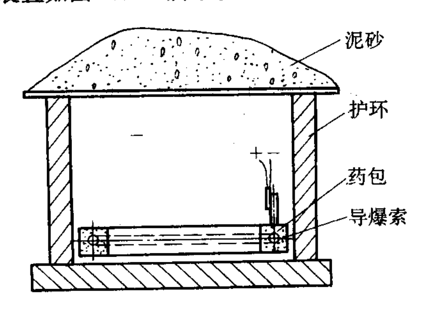


图 7.5-32 护环爆炸强化装置

将炸药包制成环形，放在护环下端部位。爆炸时由于强大的冲击波作用，使护环下端扩大变形。此时护环成为下大上小的喇叭状。然后再将护环倒置，使用同样的方法，使该端扩大，达到上下端直径基本相近。

随着爆炸变形量增加，强度也不断增加。但每次变形量不宜太大，否则将产生裂纹而报废。每次周向相对变形量宜控制在 2%～8% 左右，一般需经 5～7 次爆炸才能完成。炸药量则根据变形量大小来决定。

1.2 万 kW 发电机护环的爆炸强化情况与产品要求对比见表 7.5-10。

(6) 复合工序的爆炸成形

对于复杂的薄壁环形件，例如图 7.5-33 所示的遮板类零件，采用常规冲压方法需经拉深、胀形、压印、冲孔和切边等多道工序才能完成，每一道工序都必需配备相应的设备和模具。这样不但生产效率低，而且准备周期长，成本高。

表 7.5-10 护环爆炸强化后的性能与产品要求对比

1.2万kW护环	护环尺寸/mm			变形量/%		力学性能				抗弯	残余应力/MPa	备注
	内径	外径	高	内径	外径	σ_s/MPa	σ_b/MPa	δ/%	ψ/%			
产品要求	650	735	385			750	850	18	30	<150°不裂	<150	
爆炸强化前	500	640	580			361	815	69	57	<150°不裂		
爆炸强化后	615	742	494	23	16	910 762	1 090 1 020	30 39	38 44	<150°不裂 <150°不裂	6.9 22.5	内壁取样 外壁取样

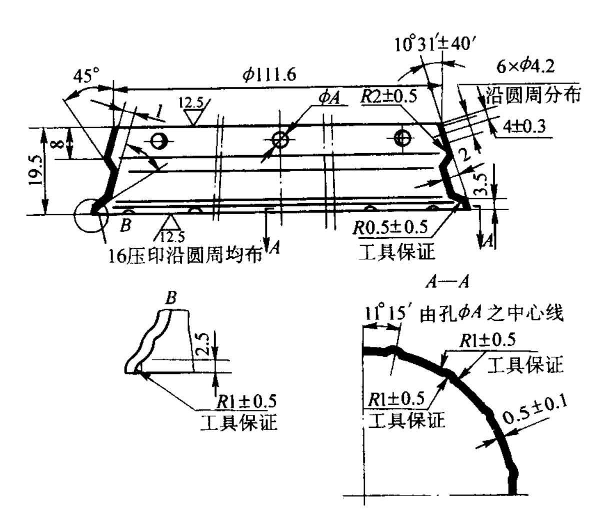


图 7.5-33 遮板零件图

采用爆炸成形工艺，只需一个复合模，经过一次爆炸，可以同时完成胀形、压印、冲孔和切边等工序，得到形状复杂、精度高的合格零件。其技术要点如下：

1) 工艺方案。采用水介质、反射板、自然排气爆炸成形，成形装置如图 7.5-34 所示。

2) 模具结构。由凹模、模套、上下靠板、上下垫板六部分组成，如图 7.5-35 所示。

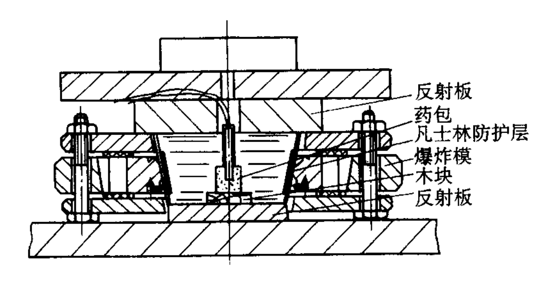


图 7.5-34 遮板成形装置

凹模型面上钻有六个 ϕ4.2 的小孔和十六个压印穴。为了在成形后便于取出零件，将凹模分成三瓣，用三个锥形螺钉定位夹紧。凹模和模套以锥度配合。凹模上下口保持锐角，作为切边刃口。

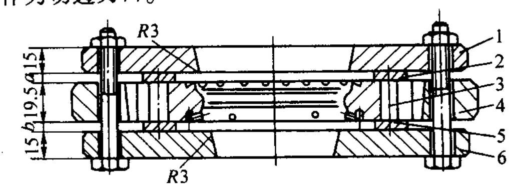


图 7.5-35 复合爆炸模

1—上靠板；2—上垫块；3—凹模；4—模套；5—下垫块；6—下靠板

3) 爆炸工艺参数。如表 7.5-11 所示。



表 7.5-11 遮板爆炸工艺参数

坯料尺寸/mm	材料	药包		垫块厚度/mm		边界条件		坯料搭边/mm	
		药量	药位	上垫块	下垫块	上部	下部	上部	下部
上口 ϕ124 下口 ϕ100 高 60	T2 (厚 0.70 ~ 0.76)	TNT 5 克	位于凹模中心	6	6	刚性反射板	刚性反射板	10	10

4 爆炸成形安全守则

爆炸成形危险性大，必须严格执行操作规程，遵守下列安全守则：

1）操作人员必须熟悉炸药性能、用途及相关使用规范。

2）炸药的领取、放置及引爆均应由专职人员执行，以防意外。

3）对任何炸药均要谨慎对待，特别是雷管的撞击灵敏度极高，切不可与他物撞击，更不可掉落地上，要远离火源和电源，要严格与其他炸药分开贮藏、分开运输。

4）无线电波和雷雨均可能引发爆炸，因此，爆炸成形场地不宜靠近无线电收发装置，也不宜在雷雨天进行。

5）用多药包引爆时，并联线路或串联-并联线路只有在电源可靠时才能用，其线路必须正确地平衡起来，保证所有药包同时起爆，若有不平衡，就有可能使某些药包发生拒爆的危险。

6）安装雷管、接线及起爆必须由同一人操作。

7）炸药库必须远离工作场地，贮放 2 kg 的，要远离 30 m，贮放 30 kg 的，要远离 70 m 以上。

8）炸药库必须由钢筋、混凝土制成，最好位于偏僻的山旁或深入地下，室内要通风，保持干燥。

9）在工房内禁止使用黑色金属工具。

编写：黄良驹（吉林大学）



第6章 电磁成形

1 工艺基础

1.1 基本原理

电磁成形工艺是利用瞬间的高压脉冲磁场迫使金属产生塑性变形的制造工艺，属于高能率加工范畴。该工艺适于管材的胀形、缩径、冲孔、翻边、切断、焊接；板材的冲孔、压印或压花、成形；组装件的装配、粉末的压实和成形等。因其相对于传统的金属压力加工方法具有一系列独特的优点，可以应用于汽车、电子、仪器仪表、军工等领域。电磁成形方法模具简单、生产效率高，具有广阔的发展前途。

利用电源对储能电容器充电，当高压开关闭合时，储能电容器对加工线圈放电，在加工线圈中产生一个脉冲电流，并在加工线圈周围形成脉冲磁场（图 7.6-1）。将绝缘体放在线圈内部，它并不妨碍磁力线自由通过（图 7.6-2），而当管状导体工件放在线圈内部时，与闭合回路和脉冲磁场切割时情况相同，强磁场在工件内产生感应电流，方向与线圈电流方向相反。这一感应电流所产生的磁通阻止初始磁通穿过工件，迫使磁力线密集在线圈和工件的间隙内。密集的磁力线具有扩张的特性，因而工作表面各部分都受到沿半径向内的电磁脉冲力（图 7.6-3）。当磁场力达到材料的屈服应力时，即发生塑性变形。如果在工件内放置模具，则管壁就被压紧在模具上从而使管材成形。

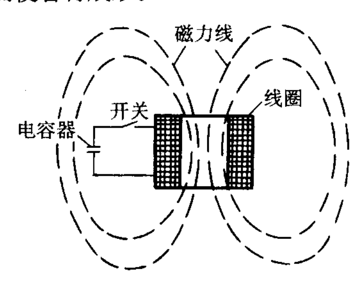


图 7.6-1 螺线管形线圈的磁场分布

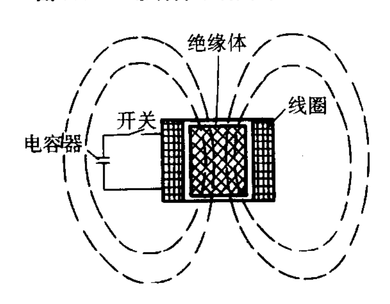


图 7.6-2 螺线管线圈的绝缘体不改变磁场分布

工件所受的电磁脉冲力仅在线圈磁场增长期间存在。在图 7.6-3 中工件外表面受到的磁场力为：

$$P=\frac{1}{2}\mu\left(\frac{r_0}{r}\right)^4\left(\frac{i}{n}\right)^2 \tag{7.6-1}$$

式中，r、r_0 为加工线圈的内、外半径；i 为放电电流；n 为线圈匝间距；μ 为材料磁导率。

电磁成形利用电磁脉冲力实现对金属的加工，而不是机械力。在脉冲压力作用下，金属获得很大的加速度，并获得很大的动能。金属成形主要是靠这种动能来实现的。与其他成形工艺相比，电磁成形具有如下特点：

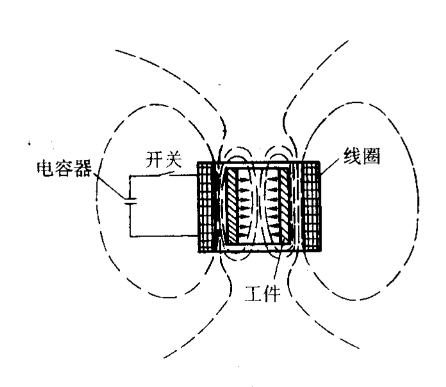


图 7.6-3 电磁成形原理

1）电磁成形过程不受运动部分机械惯性的影响，可实现快速加工，易于实现机械化、自动化，生产率高。

2）电磁成形利用电磁力，不需传压介质，避免了机械接触，对工件不产生摩擦。磁场可透过非导电隔层或在高温、惰性气体和真空环境下对金属进行加工，不会污染工件表面或破坏其光洁度、绝缘层和保护膜，工件在加工前可先电镀、喷漆，成形后表面粗糙度不受任何影响。由于电磁成形不存在机械磨损，无需润滑。

3）具有良好的可控性和重复性。电磁成形过程中，放电能量可以准确控制，决定了工艺重复性好。由于能精确控制所施加的力，所以，可以把金属零件压合在陶瓷、玻璃、塑料等易碎非金属零件上，而不引起后者的损坏。

4）工装简单，只需一个凸模和凹模即可实现加工，简化了模具制造。在同一电磁成形装置上，只要更换线圈和集磁器便可进行不同形状零件的加工，提高了加工柔性。

5）坯料所受单位压力大，成形速度快，加之感应电流的热效应，可提高材料的塑性，并降低残余应力。

6）工作噪声小，设备操作与维护简单。

7）材料导电性差和坯料形状不利于产生感应电流时，成形困难，需借助导电性好的驱动片进行加工。

8）深拉深件成形困难，需采用与成形件一致的线圈多次拉深成形。

9）成形高密度材料（如钢）时，线圈强度显著下降。

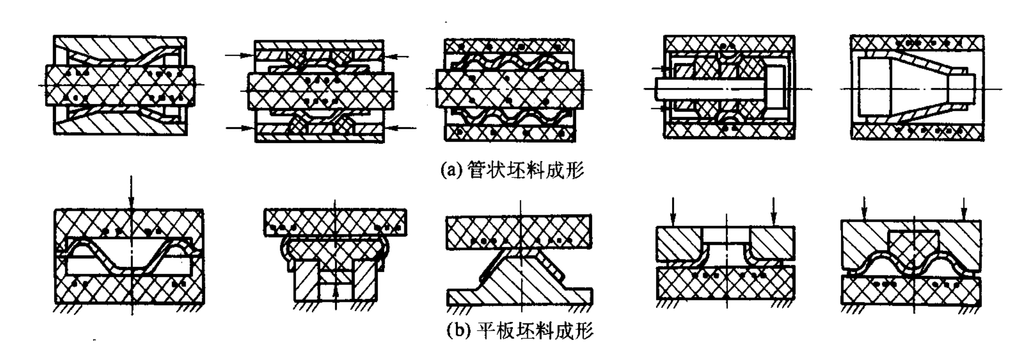
10）受设备能量限制，工件几何尺寸不宜过大。

电磁成形的基本加工方法如图 7.6-4 所示。按加工坯料的形状，电磁成形可分为管状坯料成形和平板坯料成形。

电磁成形广泛应用于管材、板材的成形、连接及冲裁，对一些特殊零件则是可以优先选用的工艺方法。

1.2 电磁成形材料

电磁成形时，对于导电性好的材料（如金、银、铜、镁、铝及其合金以及低碳钢等）可采用直接加工方式，其成形效率取决于被加工材料的电导率。对于导电性差的材料（如不锈钢、钛合金等），需在其表面涂敷一层导电性好的材料（如铜、铝等）再进行加工，或在坯料与成形线圈之间放置导电性好的材料作为“驱动片”，采用间接方式进行加工。这种加工方式可以将电磁成形扩展到非导电材料的成形加工。适于电磁成形加工的材料及其力学与电气性能如表 7.6-1 所示。



(a) 管状坯料成形

(b) 平板坯料成形

图 7.6-4　电磁成形的基本加工方法

表 7.6-1　适合采用电磁成形工艺加工的材料

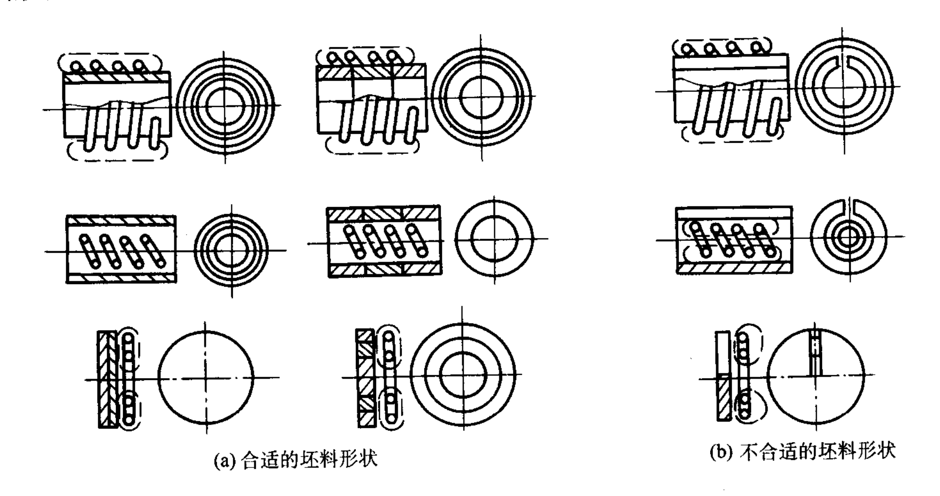
材料	弹性模量 /MPa	屈服强度 /MPa	极限应变 /%	电阻率 /10^{-8} Ω·m	趋肤深度/mm				
					1 kHz	5 kHz	10 kHz	20 kHz	50 kHz
金	80 ~ 150	—	—	2.2	2.36	1.055	0.746	0.527	0.334
银	150 ~ 300	—	—	1.6	2.01	0.898	0.636	0.449	0.285
铜	240	70	50	1.78	2.12	0.95	0.67	0.48	0.30
黄铜	240	60	50	4.3	3.3	1.48	1.04	0.82	0.467
L96	260	120	45	4.0	3.18	1.42	1.01	0.71	0.45
L90	320	120	50	6.0	3.9	1.74	1.23	0.87	0.552
L80	320	100	55	6.9	4.18	1.87	1.32	0.93	0.592
L70	320	100	55	7.2	4.25	1.91	1.35	0.95	0.602
L68	330	110	50	7.2	3.86	1.73	1.22	0.86	0.546
L62	400	160	40	10.8	6.23	2.34	1.65	1.17	0.881
LMz 58-2	400	140	45	6.8	4.15	1.86	1.31	0.93	0.587
青铜	400	250	65	17.6	8.67	4.1	2.11	1.49	0.945
BrOF65-04	350	650	40	8.7	4.69	2.1	1.48	1.05	0.664
BrOz4-3	380	160	65	9.95	5.02	2.25	1.59	1.12	0.71
BrA5	400	300	25	11	5.28	2.36	1.67	1.18	0.748
BrAMn9-2	400	200	50	15	6.16	2.75	1.95	1.38	0.872
BrKMn-1	500	300	30	6.8	4.15	1.86	1.31	0.93	0.587
高熔点铝合金									
ADM	80	30	35	2.92	2.72	1.22	0.86	0.61	0.385
ADM	150	100	6	2.98	2.75	1.23	0.87	0.61	0.389
AMnM	130	50	23	3.76	3.08	1.38	0.98	0.69	0.436
AMnN	220	180	5	4.45	3.34	1.5	0.06	0.75	0.473
AMgM	190	100	23	5.09	3.59	1.6	1.13	0.8	0.508
AMg3M	190	90	15	4.95	3.54	1.58	1.12	0.79	0.501
AMg6M	300	150	18	7.1	4.24	1.9	1.34	0.95	0.6
DIM	210	110	18	3.72	3.08	1.37	0.97	0.7	0.436
DIT	420	240	15	3.7	3.06	1.37	0.97	0.68	0.433
DI6M	180	100	18	4.35	3.32	1.48	1.05	0.74	0.47
DI6AT	420	280	18	5.87	3.85	1.72	1.22	0.86	0.545
DI6M	210	110	18	4.15	3.25	1.45	1.02	0.72	0.46
DI6T	460	300	11	5.95	3.88	1.74	1.23	0.87	0.548
B95M	220	100	15	4.15	3.25	1.43	1.02	0.74	0.46
B95T	550	460	10	4.2	3.82	1.46	1.03	0.73	0.54
镁合金									
MA8M-M	260	190	18	5.1	3.6	1.61	1.15	0.8	0.51
MA-1M	210	120	8	6.1	3.93	1.76	1.24	0.88	0.556
低碳钢									
CT3	380	240	37	16.4	6.45	2.9	2.04	1.44	0.913
CT10	400	250	35	19.25	7.0	3.12	2.21	1.56	0.99
CT20	480	300	33	24.2	6.0	2.7	1.9	1.34	0.85

续表 7.6-1

材料	弹性模量 /MPa	屈服强度 /MPa	极限应变 /%	电阻率 $/10^{-8}\ \Omega\cdot m$	趋肤深度/mm				
					1 kHz	5 kHz	10 kHz	20 kHz	50 kHz
合金钢 39XGSA 1X18H9T	 700 990	 450 300	 22 50	72	13.5	6.04	4.2	3.02	1.91
钛合金 BT5-1 BT14	 900 1 000	 800 900	 14 10	138	18.7	8.36	5.91	4.18	2.65

1.3 电磁成形的坯料

电磁成形是利用线圈磁场与坯料感应电流的相互作用来实现的，因此坯料形状必须能够让感应电流形成闭合回路。当坯料在成形区域有平形于轴线的缝、槽或多个孔时，作用于坯料的电磁力下降，成形效率降低，此时应考虑采用间接加工的方式。图 7.6-5 给出几种适合与不适合直接加工方式的坯料形状。



(a) 合适的坯料形状　　(b) 不合适的坯料形状

图 7.6-5　电磁成形的坯料形状

电磁成形的坯料厚度可达 5 mm。为避免产生“磁垫效应”，坯料厚度尺寸 a_W 应满足：

$$a_W \geqslant \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} \tag{7.6-2}$$

式中，σ 为坯料材料电导率；ω 为放电角频率；μ 为材料磁导率。

电磁成形所能加工的坯料几何尺寸由电容器储存的能量、坯料厚度、线圈及模具工装的强度等决定，坯料尺寸的确定方法与常规工艺相同。坯料可以是焊接件，但焊缝必须均匀，而且，应去除焊缝部分的多余金属，否则会导致变形不均匀。一般情况下，当模具为绝缘材料时，$a_W \geqslant 0.5$ mm；当模具为导电材料时，$a_W \geqslant 2$ mm。

1.4 线圈

(1) 对线圈的要求

工作线圈是电磁成形中最关键的元件，线圈将电能转变成磁能，它直接与坯料作用，其参数及结构直接影响成形效果。线圈的结构应根据工件的形状和变形特点设计。常见的结构形式有：平板式线圈、多叠式线圈、带式线圈和螺管线圈。前两种适用于板坯成形，后两种适用于管坯成形。

按使用寿命线圈可分为一次性的和永久性的两种。一次性简易线圈成本低，主要用于工艺试验或单件生产，成形后，由于磁场力和脉冲电流的作用，线圈被烧毁。永久性线圈用于批量较大产品的生产，永久线圈应满足以下要求：

1) 具有足够的机械强度，能够承受连续强冲击载荷而不被破坏。

2) 电器绝缘部分能长期承受高压、大电流作用。

3) 在连续工作情况下，温度不能超过线圈绝缘材料容许范围，否则可能发生绝缘击穿或机械损坏。

4) 线圈与坯料间的互感要大，漏感要小，能有效地将电容器所储存的电能转化为工件的变形能。

5) 具有合理的放电频率，放电回路总电感 L 应满足：

$$R^2 < 4L/C \tag{7.6-3}$$

式中，R 为放电回路总电阻；C 为电容。

6) 具有能满足加工要求的磁场分布或将磁场集中于加工区域。

为了提高线圈的机械强度，永久性线圈常用铍青铜之类强度大、电阻率小的材料及截面粗的导线绕制，并用环氧树脂等绝缘材料浇铸固化以增大其质量和强度。由于线圈在放电期间所吸收的机械功反比于其质量，因而加大线圈质量就减少了它所受的冲击力。

在确定工作线圈结构尺寸时，应使工作线圈尽量靠近成形坯料，过大的距离将降低成形效率。线圈在放电过程中的发热是必须考虑的问题。如果发热严重，会大大降低加工线圈绝缘材料的力学性能和电性能，导致加工线圈的破坏。

加工线圈单次加工温升 Δt 按下式计算

$$\Delta t = \frac{Q}{mc} \tag{7.6-4}$$

式中，m 为加工线圈导线质量；c 为导线材料比热容；Q 为



加工线圈发热量，$Q=0.24I_m^2R/(4\beta)$；β 为电流衰减系数。

为了满足电磁成形工艺的要求，线圈应具有如下特点：

1）高效地把电能转变成坯料塑性变形功。

2）具有足够的强度、刚度及可靠的绝缘性。

3）适宜的放电频率。

针对不同的电磁成形工艺及成形件形状，实际应用时有多种形式的线圈。按成形工艺特点可分为缩径线圈、胀形线圈、平板线圈等。缩径线圈没有严格的尺寸限制，为了提高加工柔性、降低成本，通常制成不同尺寸系列的标准线圈，再与不同尺寸的集磁器配合使用。线圈在放电过程中受到的工件的反作用冲击力，一般可达 340 MPa，因而线圈必须具有抵抗这种冲击力的强度。胀形线圈受到导线及芯棒的尺寸和强度限制，其外径最好大于 50 mm。在确定工作线圈结构尺寸时，应使工作线圈尽量靠近成形坯料，过大的距离将降低成形效率。如图 7.6-6 所示为普通的工作线圈，图 7.6-7 为高寿命结构的工作线圈。

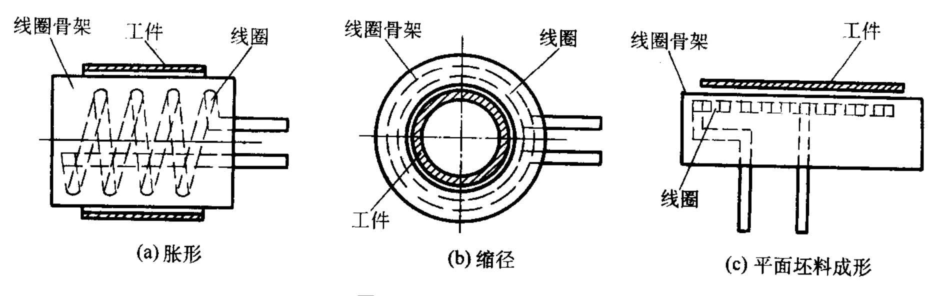


图 7.6-6 普通加工线圈

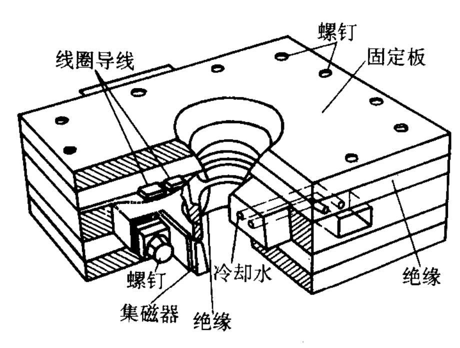


图 7.6-7 长寿命结构线圈

（2）螺线管线圈

图 7.6-8 所示为螺线管线圈及带集磁器的螺线管线圈轴线上的磁感应强度分布。可以看出，螺线管线圈的磁感应强度分布是比较均匀的，但集磁器的螺线管线圈的磁感应强度更加均匀。

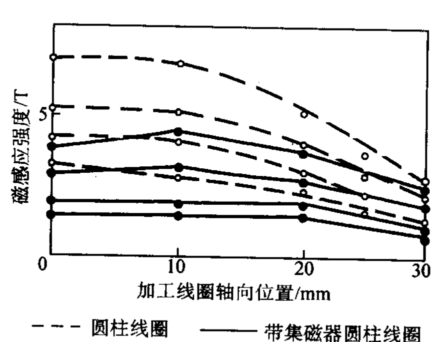


图 7.6-8 螺线管线圈轴线上磁感应强度分布

电磁成形时，磁力线主要集中于加工线圈与坯料之间的间隙中，坯料受到这一磁场力作用而变形。这一磁场磁感应强度的数值及分布与加工线圈轴线上磁感应强度的数值及分布是有区别的。图 7.6-9 及图 7.6-10 所示是螺线管线圈与坯料间磁感应强度的测量结果。可见，加工线圈长度较大时，磁感应强度的分布更趋于均匀。

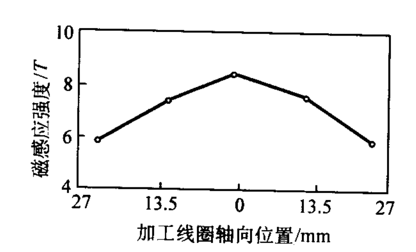


图 7.6-9 短线圈磁感应强度分布

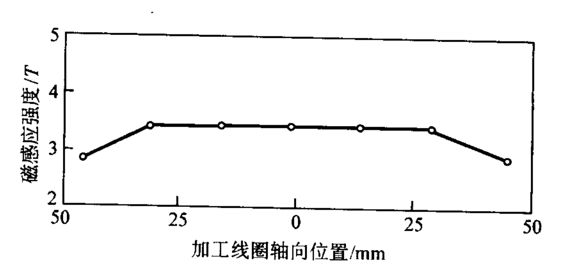


图 7.6-10 长线圈磁感应强度分布

（3）平板线圈

平板线圈的磁感应强度分布是很不均匀的，如图 7.6-11、7.6-12 所示。磁场的径向分量在加工线圈中心部分很小，在加工线圈的半径中部最大。

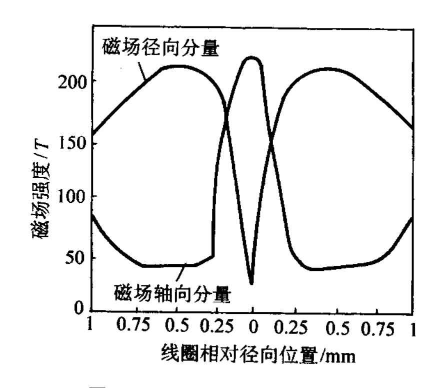


图 7.6-11 平板线圈磁场分布

平板线圈与坯料间隙的中心部分磁感应强度最小，随着半径增大，磁场力增大，在二分之一半径附近达到最大值，而后随半径增大磁场力又减小，因此在平板坯料成形时，工



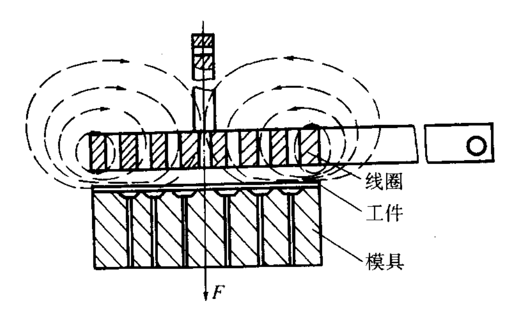


图 7.6-12 平板线圈

件中心部分因压力不足而贴模不良。为克服上述不足，通常采用间接加工方法，磁场力使驱动块向下运动并压迫弹性传压介质而使工件变形。

1.5 集磁器

集磁器（磁通集中器）是电磁成形中的主要工装，一般采用高导电率、高强度材料（如铍青铜等）制成，放在线圈内部。它可以改善磁场分布，把磁通移向集磁器和工件之间的间隙内，以满足成形工件的要求，并且可以分担线圈所受的部分机械负荷。根据不同工件的要求，集磁器可以设计成各种形状，以加强局部磁场。

集磁器通过改变内壁形状来改变磁通分布，使某些空间磁场加强，另一些空间磁场减弱，达到成形不同工件的目的。图 7.6-13 是缩径用集磁器，磁场在坯料的中间部分最强，可以使坯料在该处收缩。

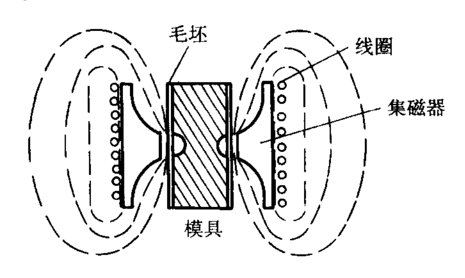


图 7.6-13 集磁器

集磁器原理如图 7.6-14 所示。放在线圈内的集磁器类似一个脉冲变压器的短路二次线圈。当线圈中通过脉冲电流 i_1 时，集磁器内感应了一个表面电流 i_2。集磁器外表面的感应电流方向与线圈电流相反，产生的磁场部分抵消了线圈电流的磁场；而内表面感应电流产生的磁场对工件施以径向压力。可以认为，集磁器起了一个将磁通移向集磁器与工件之间的作用。这样，绝大部分冲击力将作用在集磁器内壁上，从而减少了线圈所受之力。

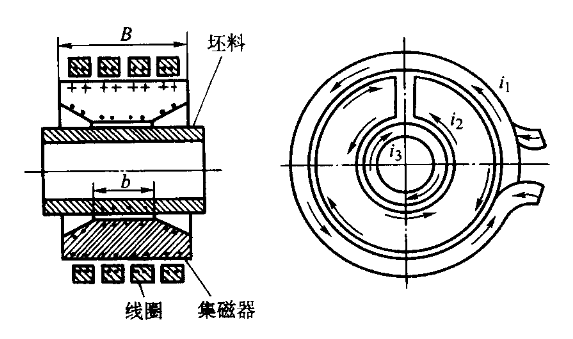


图 7.6-14 集磁器原理图

由集磁器原理图可见，集磁器上必须在沿高度方向开一径向缝隙如图 7.6-15 所示。否则，磁通将被集磁器的感应环流屏蔽。不但不能移至工件与集磁器内表面之间，反而被迫密集在集磁器与线圈之间。这样，被成形的将不是工件而是集磁器了。

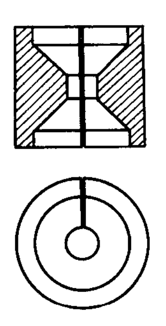


图 7.6-15 集磁器的缝隙

集磁器的纵向缝隙宽度要适宜，太宽则增大缝隙间的漏磁通，太窄则易击穿，一般取 0.2～0.5 mm。为防止击穿，也可在缝隙内填加绝缘材料。常见的集磁器结构如图 7.6-16 所示。

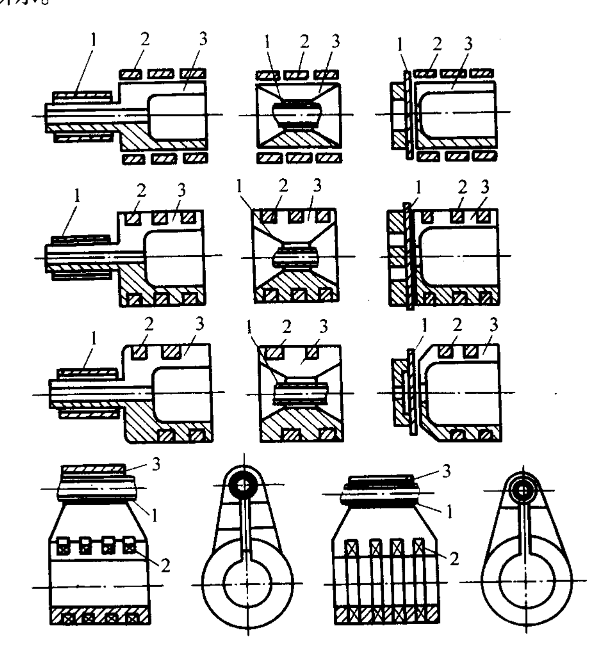


图 7.6-16 集磁器的各种结构
1—坯料；2—线圈；3—集磁器

通过改变集磁器外形尺寸及控制放电能量，对精度要求不高的零件还可实现无模成形。制作集磁器比制作线圈更容易，成本更低。在一个成形线圈上更换不同的集磁器，就可对不同尺寸的管子进行各种形状的加工，这更利于批量生产。

1.6 模具及驱动片

（1）模具

电磁成形对模具材料及其热处理的要求较常规工艺要低。电磁成形模具的材料决定于成形零件的形状、厚度及材料力学性能。对试制或小批量生产，模具可采用非金属材料(如木料、有机玻璃、增强树脂等易加工材料)；当成形零件的生产批量大，所用工件材料较硬时，一般采用钢质模具；对复杂形状的冲孔加工，模具应采用工具钢或冷冲模具钢，需热处理到 56～60 HRC。

在选用模具材料时，应尽量避免使用导电性好的材料。当采用导电性好的材料做模具时，工作线圈的脉冲电流也将



在凹模内产生感应电流，其结果将阻止坯料向模具贴靠，有时甚至可能对坯料起排斥作用。尤其当成形坯料较薄时，这种现象更为严重。当坯料厚度无法满足式（7.6-2）时，模具采用绝缘材料，否则，工件会因“磁垫效应”而无法贴模。

电磁成形时，坯料以很高的运动速度向模具表面贴靠，所以当模具封闭性强时，应设有足够的排气孔，以便排出压缩空气，必要时应设置抽真空系统。通气孔开在后续贴模的部位（如图 7.6-17 所示），数量根据工件形状及封闭型腔体积确定，孔径 $d < a_w$，间距 $l_p = 20 \sim 40$ mm，孔深 $l_1 = 6 \sim 10$ mm，沉孔直径 D（2～3）d。为便于取出工件，模具常采用分剖式结构。

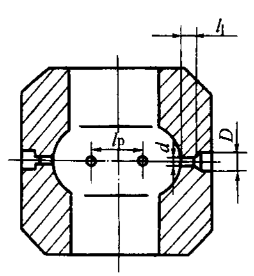


图 7.6-17　通气孔结构

（2）驱动片

电磁成形要求材料有较好的导电性能，金、银、铜、铝及其合金最适于电磁成形加工，而低碳钢、不锈钢、钛合金等金属材料导电性能差，电磁成形效率低。在用电磁成形方法加工这些金属坯料时，为了提高成形效率，可在成形坯料与工作线圈间放置一个驱动片，驱动片外形尺寸一般大于或等于加工区域。利用驱动片的高导电性，使其带动低导电性材料成形。

生产中常用退火紫铜做驱动片。驱动片的厚度应适宜，太薄时，磁场扩散透过了驱动片，因而作用力减小；太厚时，则由于其本身变形耗能太大，减小工件的变形效果。实验表明，对于某一确定条件，驱动片厚度有一最佳值。例如对 0.5 mm 厚不锈钢平板坯料成形时，驱动片厚度最佳值为 0.4 mm。

2　连接工艺

2.1　连接方式

电磁成形非常适合于管－管、管－杆、管－板等连接，可实现管与芯棒、软管与接头以及金属与玻璃、陶瓷等脆性材料之间的连接。磁脉冲连接工装简单，与零件无机械接触，不损伤零件表面，加工能量可准确控制，能实现零件的精确连接装配。对于一些特殊零件，磁脉冲连接是优先选用甚至是唯一可以采用的工艺方法。

磁脉冲连接按机理可分为机械连接与复合连接两大类。在金属与金属或金属与玻璃、陶瓷等非金属材料的连接过程中，当连接件间达不到足够的冲击速度时，连接主要靠接触面间的摩擦力或肋槽间的机械镶嵌力保证，这种连接属机械连接；在金属与金属的连接过程中，当两连接金属间有足够的冲击速度及碰撞能时，脉冲磁场力产生一瞬时高压、高速的冲击波作用在金属上，使其以高速向另一金属猛烈撞击，在两金属接触界面的一些先撞击点产生射流及高应变速率的金属塑性流动。射流冲刷或清除了两金属待复合面的氧化层及吸附层，使两金属实现原子间力的结合，这时靠两金属界面原子间的结合力实现了连接，这种连接就是复合连接。研究结果表明，脉冲力达到 400 MPa 时，同种或异种材料均可实现复合连接，此时速度可达几百米/秒。

磁脉冲连接主要包括以下几种方式，见表 7.6-2。

表 7.6-2　磁脉冲连接方式

连接方式		示　意　图	特　　点
管－杆连接	不带集磁器	线圈 管件 杆件	线圈只能放于外部，因此，只能采用内缩式连接。当线圈强度不够或能量不足时，可选用集磁器，以集中能量和保护线圈
	带集磁器	线圈 集磁器 管件 杆件	
管－管连接	内缩式	线圈 外管 内管	线圈可放于连接管外部，也可放于连接管内部，因此，内缩式及外胀式两种方案都可采用



续表 7.6-2

连接方式		示意图	特点
管－管连接	外胀式	外管 内管 线圈管	线圈可放于连接管外部，也可放于连接管内部，因此，内缩式及外胀式两种方案都可采用
管－板连接	内缩式	线圈 管件 板件	可以采用内缩式及外胀式两种连接方式。管件与板内孔连接时，只能采用外胀式；而管件与板外缘连接时，则只能采用内缩式。对于内缩式连接，当管径较小时，应考虑采用集磁器
	外胀式	板件 管件 线圈	

在管连接工艺中采用集磁器时，集磁器应靠近硬度较低的金属管。即软金属管在外侧时，采用外置集磁器结构；而软金属管在内侧时，则采用内置集磁器结构。一般情况下，采用外置集磁器时，管外径可在 2 ~ 152 mm 之间；采用内置集磁器时，管内径在 152 ~ 304 mm 之间。

2.2　管－杆连接的影响因素

管－杆连接的连接效果可以通过检测连接强度来评定。连接强度是以轴向拉伸试验中，管杆接触面分离或管杆拉断的最大载荷作为主要指标的。

1）放电参数与连接间隙对连接强度的影响见表 7.6-3。

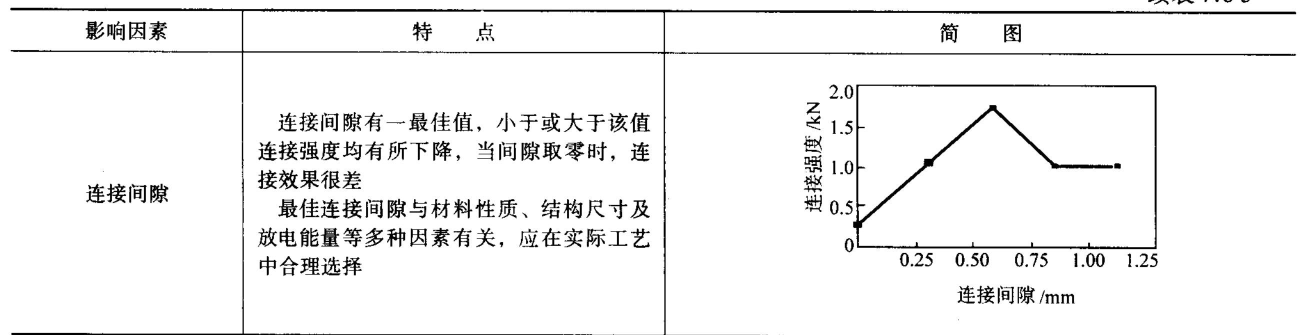
2）接头结构型式的影响。要得到较高的连接强度（甚至超过管的强度极限），仅靠连接面的摩擦力是无法实现的，必须在杆件上开设沟槽。图 7.6-18 所示为铝管与五种接头的连接，图 b ~ 图 e 所示的杆件上分别开设了单环直槽、单环弧槽、双环直槽以及螺纹槽，在脉冲力作用下，铝管被压入沟槽内，管杆间靠嵌入的配合面来抵抗拉深力。连接强度的实验结果列于表 7.6-4。

表 7.6-3　放电参数与连接间隙对连接强度的影响

影响因素	特点	简图
放电能量	随着放电能量的增加连接强度增大，连接强度与放电能量近似成正比关系	纵轴：连接强度 /kN（-2, 0, 2, 4, 6, 8）；横轴：放电能量 /kJ（2, 4, 6, 8, 10）
放电频率	连接强度随放电频率提高而增大。这是由于放电频率提高，电磁场在工件内的衰减加快，涡流损耗因之减少，因而提高成形效率；另外，放电效率提高后，振荡电流的变化速度也增大，脉冲磁场增强，这对于连接工艺是有利的	纵轴：连接强度 /kN（0, 1, 2, 3）；横轴：放电频率 /kHz（3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5）



续表 7.6-3



影响因素	特　　点	简　　图
连接间隙	连接间隙有一最佳值，小于或大于该值连接强度均有所下降，当间隙取零时，连接效果很差 最佳连接间隙与材料性质、结构尺寸及放电能量等多种因素有关，应在实际工艺中合理选择	（图）

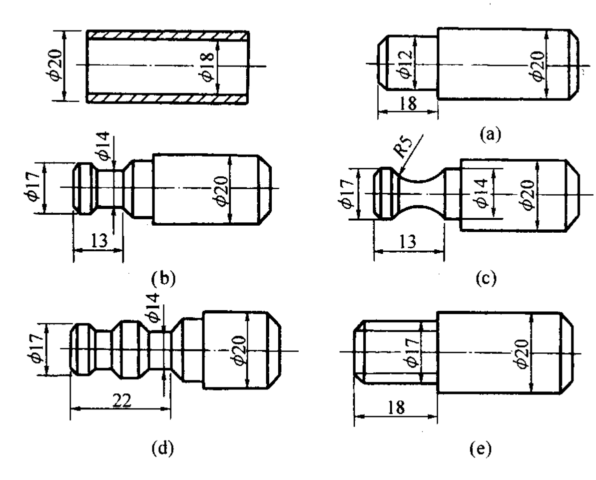


图 7.6-18　接头型式

表 7.6-4　接头型式对连接强度影响的实验数据

（放电电压 5.0 kV，放电电容 192 μF）

接头型式	图 7.6-18a	图 7.6-18b	图 7.6-18c	图 7.6-18d	图 7.6-18e
连接强度/kN	1.75	6.30	6.20	9.40（铝管拉断）	9.60（铝管拉断）

实验结果表明，在接头上开设沟槽可显著提高连接强度，但槽的型式影响不大。在拉伸过程中，嵌入槽内的部分被拉直，强脱出槽。双槽及螺纹结构的连接强度较单槽结构又有显著提高，最终接头未被拉开而是铝管被拉断，断口部位均在杆件接头端部。

2.3　管－管连接的影响因素

管－管连接的连接效果可采用复合面积率来评定。所谓复合面积率是指复合面积（扩散连接面积）与两管搭接面积比值的百分比。确定复合面积率常用的方法有锤击法、剥皮法及超声检验法，其中超声检验是比较好的方法，它可以在不损伤材料的情况下检测复合面积率。

表 7.6-5、7.6-6 给出了放电能量、放电频率以及连接间隙对铝管与铜管（ϕ50 mm，$t=1$ mm，连接带长 10 mm）连接的影响。

1）放电能量的影响。表 7.6-5 列出了在确定的电容量条件下，通过改变电压而改变能量的实验结果。在电容值较低的情况下（$C=190$ μF，$C=380$ μF），未出现复合；在电容值过高的情况下（$C=950$ μF，$C=1\ 140$ μF），也未出现复合；在电容值 $C=570$ μF，$C=760$ μF 的情况下，才取得了较好的连接效果。

2）放电频率的影响。在放电能量相同的情况下（$W=6.08$ kJ），调整电压与电容量的匹配，可以改变放电频率，表 7.6-6 列出放电频率对复合面积率的影响。

表 7.6-5　各种电容值情况下的实验结果

	电容/μF	190			380		
电容值较低	充电电压/V	3 000	4 000	5 000	3 000	4 000	5 000
	放电能量/J	855	1 520	2 375	1 710	3 040	4 750
	复合面积率/%	0	0	0	0	0	0
	电容/μF	570			760		
电容值适宜	充电电压/V	4 000	4 500	5 000	3 500	4 000	5 000
	放电能量/J	4 560	5 771	7 125	4 655	6 080	9 500
	复合面积率/%	0	25	56	46	100	100
	电容/μF	950			1 140		
电容值过高	充电电压/V	3 000	4 000	5 000	3 000	4 000	5 000
	放电能量/J	4 725	7 600	11 875	5 130	9 120	14 250
	复合面积率/%	0	0	0	0	0	0

表 7.6-6　放电频率对连接复合面积率的影响

电容量/μF	放电电压/V	复合面积率/%
760	4 000	100
950	3 600	0
1 140	3 300	0

可以看出，放电频率对连接效果有重要影响，足够的放电能量和适宜的放电频率是保证复合连接效果的两个重要条件，没有足够高的放电频率，单纯增加放电能量也不会取得满意的结果。

3）连接间隙。在相同的电参数（$C=760$ μF，$U=4$ kV），连接管搭接长度为 10 mm 的条件下，不同间隙的连接结果列于表 7.6-7。

表 7.6-7　连接间隙对连接效果的影响

间隙/mm	0	1.0	1.5	2.0
连接效果	不能实现	最好	较好	不能实现

由表可见，两管之间的间隙过大、过小都不利于连接过程。间隙过小，金属管没有加速运动过程，达不到足够的碰撞速度，同时，金属管也没有足够的塑性变形；间隙过大，由于金属变形量的加大，耗费了较多的能量，同时，两管接近时，运动速度峰值已过，碰撞速度降低。

2.4　连接方式及应用

连接加工方式的应用例如图 7.6-19 所示，其工艺要求及参数见表 7.6-8。

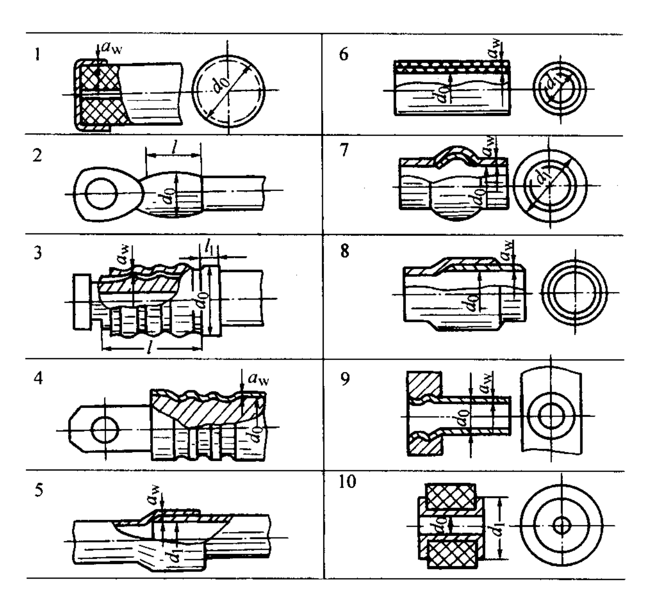


图 7.6-19　连接加工方式的应用例

3　管坯成形

3.1　管坯的变形

管状坯料成形是应用比较广泛的电磁成形工艺。管坯一般采用螺线管线圈进行加工，也可采用将电流直接通过工件的加工方式，如图 7.6-20 所示。线圈可根据工件形状绕成圆柱形、锥形或其他形状。根据线圈与坯料的相对位置及坯料的变形特点，可分为缩径、胀形和组合加工方式。

管坯胀形的成形极限主要受管坯破裂的限制，管坯的缩径成形极限则受管坯失稳起皱的限制。因此，管坯的变形过程及应变分布，对于控制管坯变形、提高成形极限有重要意义。

圆管胀形时，切向变形的均匀性与管坯长度有直线关系。图 7.6-21 所示为圆管坯料胀形时切向应变沿轴向分布情况。加工线圈长度较小（曲线 1、2）时，应变分布不均匀；加工线圈长度较大（曲线 3）时，应变分布则比较均匀。图 7.6-22 所示为圆管自由胀形时的应变分布情况，切向应变 ε_θ（曲线 3）和径向应变 ε_r（曲线 2）在数值上近似相等，而轴向应变 ε_z（曲线 1）相比之下较小。

表 7.6-8　连接加工的工艺要求

序号[①]	应用例	工艺要求、参数及特点
1	金属零件与陶瓷、玻璃、塑料和其他金属材料的连接	压接表面无滑痕，管坯与基体间的间隙要小且均匀，管坯质量远小于基体质量
2	导线与导线用管接头连接，电缆与接头的压接	$l/d_0=1.5\sim2.0$；如果导线或电缆需承受压力，则 $l/d_0=2.5\sim3.5$
3	高压软管的密封连接	$l/d_0=2.5\sim3.5$，$l_1=4\sim5$ mm
4	管与金属接头的连接	在接头上开 2~3 个槽，深 $2a_w$，宽（2~3）a_w
5	铜管与铜管、铝管与铝管、铜管与铝管的焊接	管、管间的初始间隙：1~1.5 mm
6	不同金属管的胀接	内侧管坯电导率需高于外侧管坯电导率
7	铰形连接	铰的形状由模具保证，如连接材料不同，则电导率高的管坯应放于内侧
8	管状零件焊接	管 - 管间的初始间隙：1~1.5 mm，外管的变形由模具限制
9	管与厚板、盘装零件的连接	开槽 2~3 个，深 $2a_w$，宽（3~4）a_w
10	金属零件成形装配在绝缘材料上	$d_1/d_0=1.1\sim1.3$

① 序号与图 7.6-19 的序号相对应。

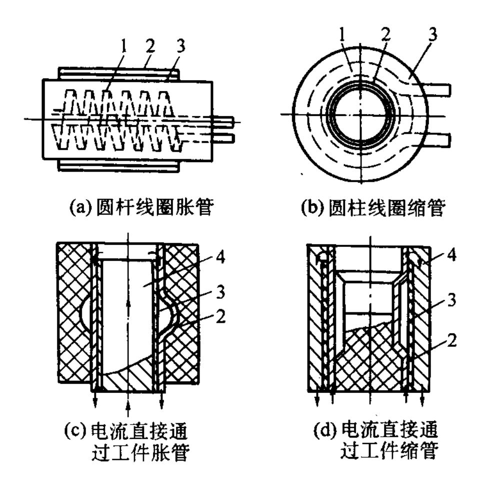


图 7.6-20　管坯加工方式
1—线圈；2—工件；3—绝缘材料；4—电极

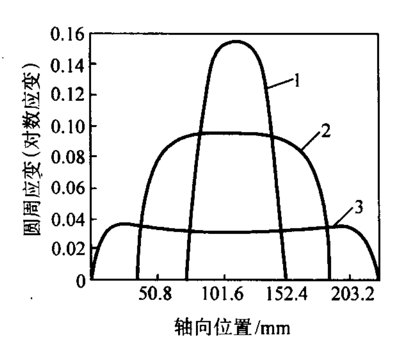


图 7.6-21　圆管胀形切向应变分布

图 7.6-23 所示为缩管成形时管材的断面变形过程，图中的曲线表示磁通密度的变化。从缩管变形开始至缩到初始半径的 1/2 这一阶段可近似为是轴对称变形，其变形速度达到 950 m/s。变形大部分产生在电流的第一波内。另外，薄壁管在低充电能量下成形时，不产生壁厚的变化，但变形过



程会产生微小皱纹。

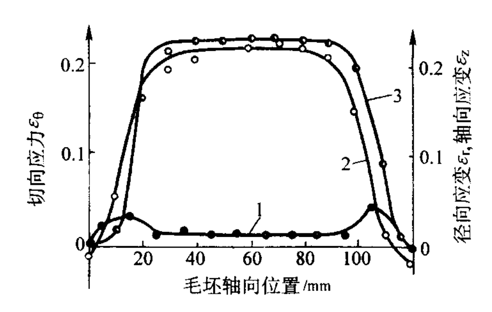


图 7.6-22　圆管坯料自由胀形应变分布

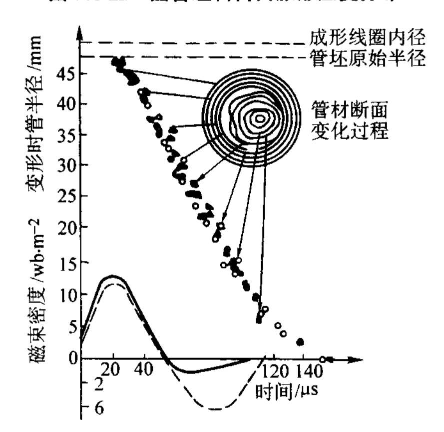


图 7.6-23　缩管断面形状的变化

为防止管件缩径时的起皱，可在圆管轴向预加拉应力，研究结果表明，在预加轴向拉应力时坯料不起皱的极限变形量大大增加。不加轴向拉应力时变形量到 8% 左右就起皱，当施加的轴向拉应力等于材料屈服应力时，坯料不起皱的最大变形量可达 20%。

图 7.6-24、图 7.6-25 所示为铝管胀形时，磁场力、管坯径向位移及径向速度随时间变化曲线。可以看出，载荷的作用时间很短。当磁场力接近最大时，坯料才开始发生变形；在磁场力下降过程中坯料达到最大径向速度；磁场力消失后，坯料将吸收的动能转化为塑性变形能，在惯性力作用下继续变形，使坯料变形时间远长于磁场力的作用时间。

3.2　胀径成形

管坯胀形主要包括自由胀形、有模胀形、成形凸筋、管端翻边、扩口、翻侧孔、异型管成形等。胀形加工时，将螺线管线圈放在工件内部，有模胀形时外面置以模具，在线圈脉冲磁场增强期间，工件受到沿径向扩张的力而成形。有模胀形的基本原理如图 7.6-26 所示。

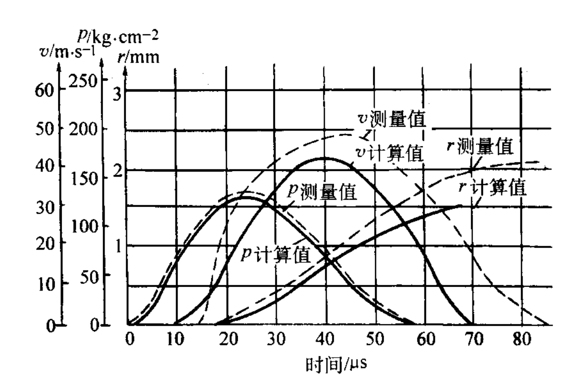


图 7.6-24　圆管胀形时径向位移和径向速度（$U = 43$ kV, $C = 180$ μF）

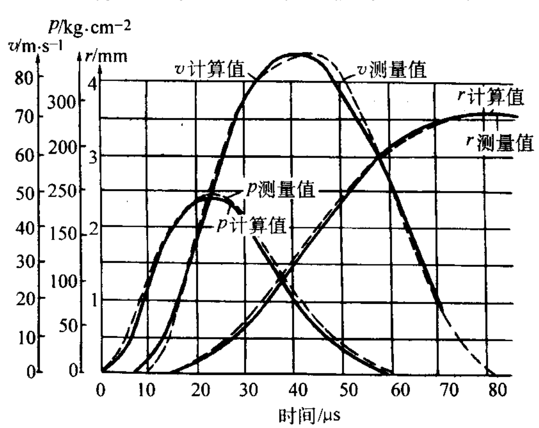


图 7.6-25　圆管胀形时径向位移和径向速度（$U = 5.65$ kV，$C = 180$ μF）

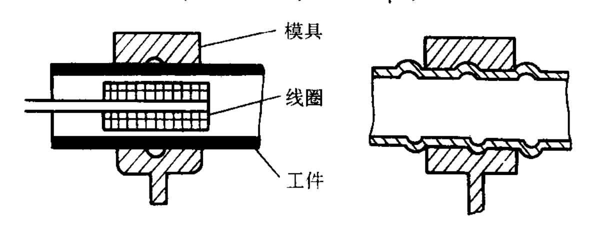
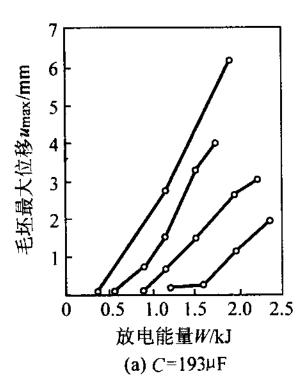


图 7.6-26　管坯胀形

壁厚变薄甚至破裂是限制管坯胀形的主要障碍，因此，提高变形坯料的壁厚均匀性是管坯胀形工艺分析和工艺设计的主要问题。

（1）管坯自由胀形

管坯自由胀形时，由于没有模具约束，其变形量及变形形状主要靠放电能量控制。坯料中间部分变形量最大。图 7.6-27 所示为坯料最大位移与放电能量的关系，图中曲线为四种参数不同的线圈对铝管自由胀形的结果。可以看出，当



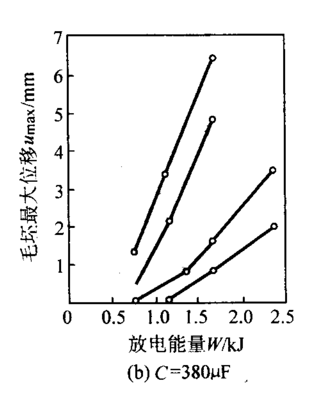
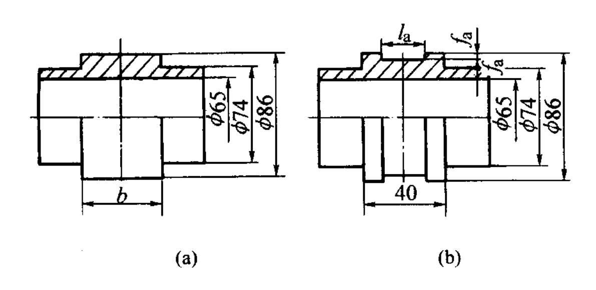


图 7.6-27　坯料最大位移与放电能量的关系



放电量低于某一值时，坯料不发生位移，能量超过某一值后，坯料最大位移随能量的增加而迅速增大。

采用集磁器的管坯自由胀形，在一定程度上可以对管坯变形进行控制，获得比较复杂形状的零件。图 7.6-28 所示为三种集磁器，图 7.6-28a 为圆柱形集磁器，在其周向长度为 b 的台阶处能够集中磁力线并产生一个很高的变形力，图 7.6-28b 和图 7.6-28c 分别是在图 7.6-28a 形集磁器的台阶部位有一个内凹和外凸的结构。



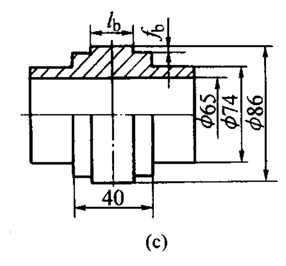


图 7.6-28　三种集磁器

(a) 圆柱形

b (mm)：5，10，20，30，40，50，60

(b) 内凹型

l_a (mm)：0，5，10，20，25，30，35，40

f_a (mm)：0，0.5，1.0，1.5，2.0，2.5，3.0

(c) 外凸型

l_b (mm)：0，5，10，20，25，30，35，40

f_b (mm)：0，0.5，1.0，1.5，2.0，2.5，3.0

图 7.6-29 所示为对外径 90 mm、壁厚 1 mm 的铝管自由胀形后的几何参数。

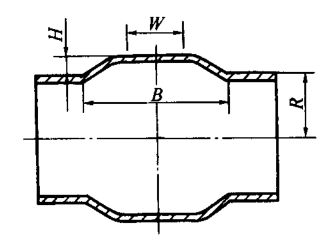


图 7.6-29　胀形后的管件

图 7.6-30～33 给出了圆柱形、内凹形及外凸型几种集磁器对管件胀形的影响。

1) 圆柱形集磁器　图 7.6-30 所示为在电容器充电电压 5 kV 的情况下，使用圆柱形集磁器胀形后的管件外形。当集磁器台阶尺寸 b 为 5～40 mm 时，管件胀形后的直径随 b 的增加而增加，胀形部分近似为圆形；当 b 值大于 50 mm 时，胀形部分接近圆柱形。

图 7.6-31 所示为不同充电电压及不同 b 值时，管件胀形的典型外形。可以看出，通过改变 b 值或充电电压可以得到不同的外形。对于不同的 b 值，在较低的充电电压情况下，均可得到圆柱形外形，增大充电电压则可得到圆形或锥形外形。

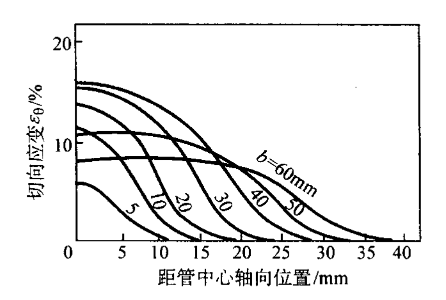
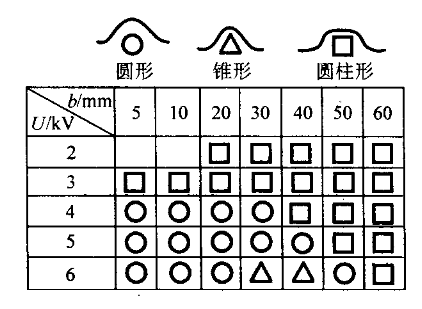


图 7.6-30　圆柱形集磁器胀管外形



U/kV \ b/mm	5	10	20	30	40	50	60
2			□	□	□	□	□
3	□	□	□	□	□	□	□
4	○	○	○	○	□	□	□
5	○	○	○	○	○	□	□
6	○	○	○	△	△	○	□

图 7.6-31　圆柱型集磁器胀管的典型外形

2) 内凹形集磁器　图 7.6-32 所示为在集磁器 b 值相同，而 f_a 及充电电压不同时的实验结果。由图可见，采用内凹形集磁器将管件胀成圆柱型外形是可能的。当 $H/R = 10\%$ 时，W/b 在大于 0.22 小于 0.48 范围内；当 $W/b = 0.5$，变形高度在 2～4 mm 范围内时，圆柱形外形的胀形都可以实现。

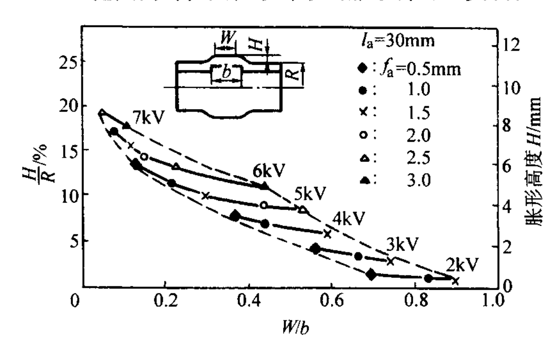


图 7.6-32　内凹型集磁器胀管成形极限

3) 外凸型集磁器　图 7.6-33 显示了采用外凸形集磁器时，充电电压和集磁器几何尺寸对胀管外形的影响。当充电电压为 5 kV 时，管件胀形后得到相似的外形，不受 f_b 的影响。而当充电电压为 7 kV 时，胀形高度随 f_b 值的增加而增加，最终外形也随 f_b 的增大而由锥形变为圆柱形。

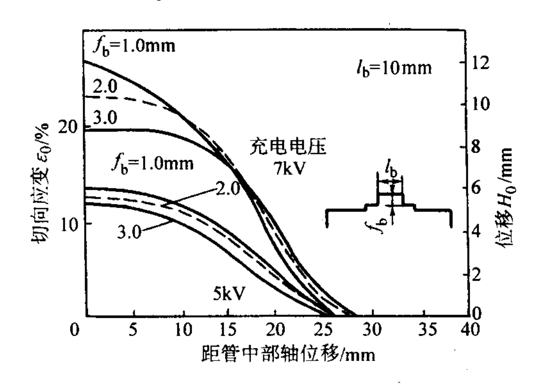


图 7.6-33　外凸型集磁器胀管外形

与内凹型集磁器相比，外凸型集磁器很难使管件成形为带有较大 W 值的圆柱形外形。

（2）管翻边

管翻边时，螺线管线圈置于管内，利用直凹模成形。如图 7.6-34 所示为厚度 0.8 mm 的铝管翻边变形过程。可以看出，当翻边部分长度比较短时（l = 10 mm），变形从管端开始，当翻边部分长度较长时（l = 25 mm），变形在管端及凹模附近同时发生。

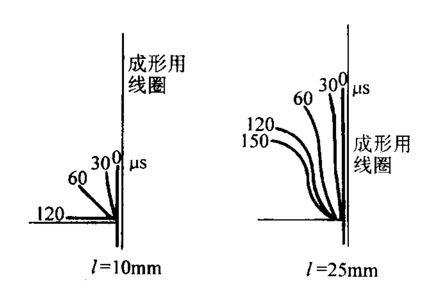


图 7.6-34　管端翻边形状变化

管坯扩口装置如图 7.6-35 所示，图 7.6-36 所示参数可用于定量确定管子扩口后的外形。图中离管子夹持架距离为

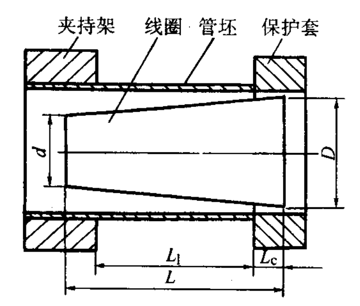


图 7.6-35　扩口装置示意图

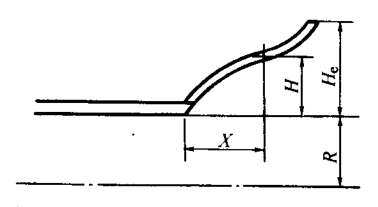


图 7.6-36　管变形后尺寸示意图

X 处管子径向位移为 H，管子端面位移为 H_e，管端初始外径为 R，扩口比为 H_e/R。

图 7.6-37 ~ 7.6-39 给出了充电能量、线圈锥度以及管端位置等对管端扩口的影响。

1）充电能量的影响。图 7.6-37 所示为充电能量与任意点处管子轮廓形状变化的关系。可以看出，管子变形量随能量的增加而增大。

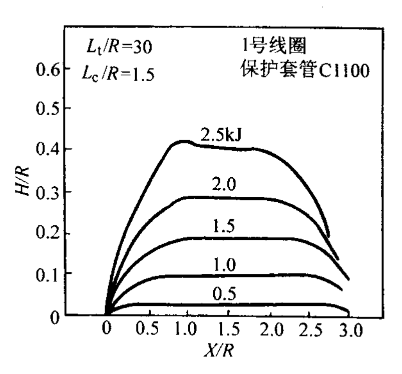


图 7.6-37　能量对扩口轮廓的影响

2）线圈锥度的影响。图 7.6-38 所示为采用铜保护套管时管子的变形与成形线圈锥度的关系。可以看出，当线圈锥度较大时，由于线圈小端直径减小，增大了线圈与工件间的间隙，磁压力随之减小，因而零件锥度增大。

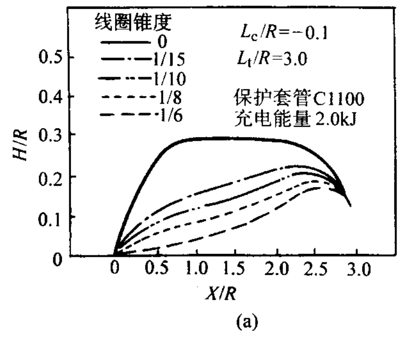


图 7.6-38　线圈锥度对扩口轮廓的影响

3）管端位置的影响。图 7.6-39 所示为管端相对位置与扩口比的关系。不论充电能量多大，当 L_c/R = 0.5 时，管子扩口比最大。当 L_c/R 小于 0.5 时，管子扩口比随着 L_c/R 的减小而减小，而当 L_c/R 大于 0.5 时，由于管子与线圈间距离增大而减小了作用于管子的磁压力，因而减小了扩口比。当成形线圈锥度为零，且 $L_c/R > 0.5$ 时，由于管子与线圈间距离均匀，扩口比基本为常数。

4）管子成形长度的影响。利用锥度等于零的线圈进行扩口时，无论成形长度多大，在相同放电能量下，管端与管子夹持架附近的变形几乎是相同的，而中间部分则呈均匀扩口形状。利用具有一定锥度的线圈成形时，不论成形长度多大，除了管子夹持架附近外，其他地方的变形基本相同。

（3）管胀形加工方式及应用

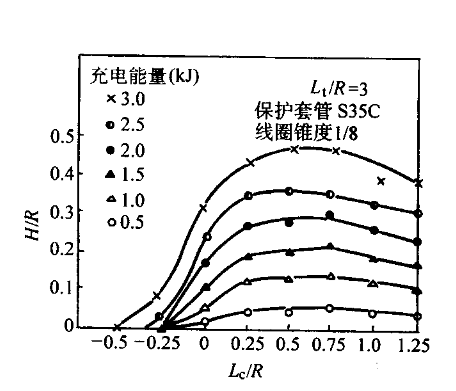


图 7.6-39　管端相对位置与扩口比之间的关系



可用胀管方式加工的管坯直径为 30 mm～2 m，壁厚可达 5 mm。直径小于 40 mm 的管坯成形较困难，但采用集磁器或直接将电流通过工件可对其加工成形。胀管加工方式的应用例如图 7.6-40 所示，工艺要求及参数见表 7.6-9。

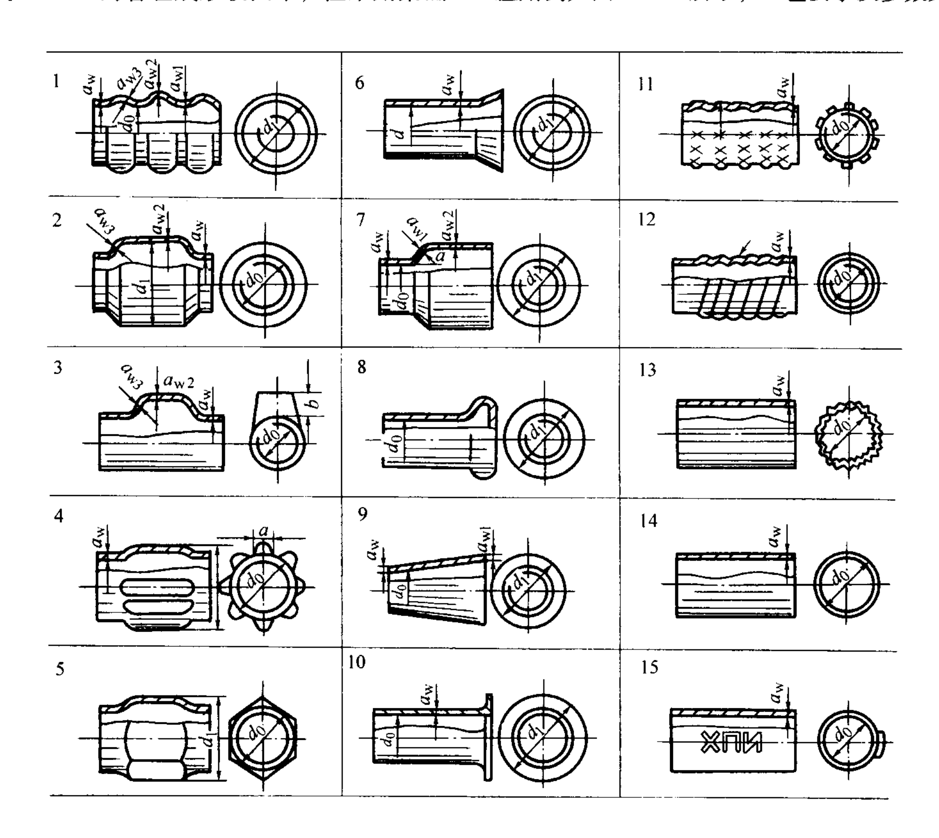


图 7.6-40　胀管加工方式的应用例

表 7.6-9　管胀形加工的工艺要求

序号①	应用例	工艺要求、参数及特点	变形分布
1，8		扩径比 $d_1/d_0 \leqslant 1.3$	$a_{w3} < a_{w2} < a_{w1} = a_w$
2		扩径比 $d_1/d_0 < 1.2$	$a_{w1} < a_{w2} < a_w$
3	突包成形	包高与管径比 $b/d_0 < 0.2$	$a_{w1} < a_{w2} < a_w$
4，5		扩径比 $d_1/d_0 < 1.2$，$a/a_w > 5$	
6，9	锥形件成形	扩径比 $d_1/d_0 < 1.3$	$a_{w1} < a_w$
7	扩口	扩口系数 $d_1/d_0 < 1.2$，$\alpha < 60°$	$a_{w1} < a_{w2} < a_w$
10	翻边	翻边系数 $d_1/d_0 < 1.3$	
11～15	起伏、螺纹成形、来复线加工、整形、压印	管坯与凹模壁的间隙为（1～2）a_w，$d_1 - d_0$ =（1～3）a_w，变形部位曲率半径小于 a_w	

① 序号与图 7.6-40 的序号相对应。

3.3　缩径成形

管坯的缩径变形包括管坯的局部缩径、管端的缩口、成形内肋等。缩径加工时，螺线管线圈置于工件外部，内部置以模具，在线圈脉冲磁场增长期间，管坯受到沿径向磁压力的作用，被压紧在模具上而成形，其基本原理如图 7.6-41 所示。

电磁成形的管坯缩径与常规冲压变形一样，其成形极限主要受管坯的失稳起皱限制，因此防皱是管坯缩径成形需要解决的关键技术。外置线圈的连接工艺，就管坯的变形性质来说也是缩径变形。

(1) 管缩径的影响因素

无模缩径是生产中经常使用的管坯电磁成形工艺。表 7.6-10 给出了管坯长度、管坯壁厚、线圈长度及放电能量等对无模缩径的影响。

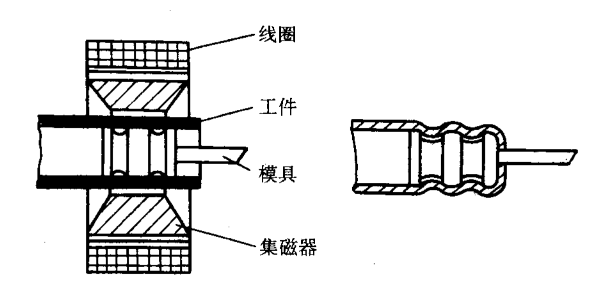


图 7.6-41　管坯缩径

表 7.6-10　管坯长度、管坯壁厚、线圈长度及放电能量对无模缩径的影响

影响因素	特　　点	简　　图
放电能量	最大减径量随放电能量的增加而增加。在相同能量时，电容量大，管坯获得的变形也大	
管坯壁厚	随电压提高，最大减径量增加，二者呈近似线性关系。管壁越厚，极限变形越大，同时，成形电压也越大。这是由于随着壁厚增加，变形抗力提高，同时管壁的抗失稳能力也提高的缘故	
管坯长度	右图中坯料为 LD2Y 铝，壁厚 1.5 mm，内径 41 mm，放电线圈长度 40 mm，外径 46 mm。长度为 40 mm 的管坯获得最大变形，但在相同电压下，其成形极限最小	
线圈长度	随着放电线圈减短，极限变形增加，极限变形时所需放电电压增高	

(2) 管缩径中的起皱

起皱是管缩径成形中容易产生的缺陷，是影响成形极限的主要因素。起皱与压力波幅值有关，当压力波幅值较小而持续时间较长时，变形量很小就发生起皱，当压力波幅值较大而持续时间较短时，变形量较大时才发生起皱。Sano 等人的研究结果认为，管坯在总变形量为 5%时发生起皱。起皱数与半径/厚度（a/h）的关系见图 7.6-42，可以看出，由于半径/厚度值的增大使管坯抗失稳能力降低，随着半径/厚度值的增大，起皱数量增加。

芯棒缩管工艺是预防起皱的有效办法，图 7.6-43 为用钢芯棒缩径时，最大减径量与放电电压的关系。由图可见，利用钢芯棒缩径显著地提高了成形极限，最大减径量达到 10 mm，是自由缩径成形极限的 2.5 倍。

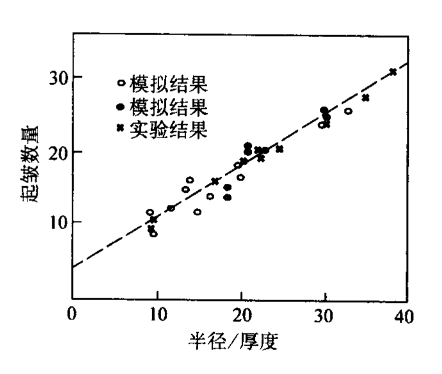


图 7.6-42　起皱数量与半径/厚度值的关系



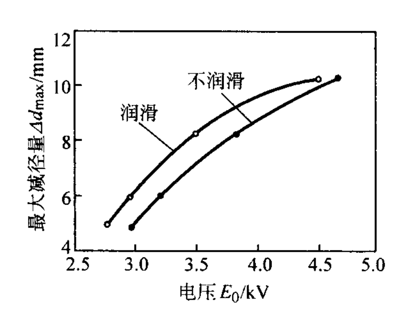
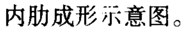


图 7.6-43 芯棒缩管最大减径量与电压的关系

(3) 内肋成形

管坯内肋的成形在生产中有较多的应用，以满足装配、配合或增加刚度等要求。在电磁成形中可通过使用压缩线圈或胀形线圈实现管的内肋成形或外肋成形。图 7.6-44 为管坯内肋成形示意图。



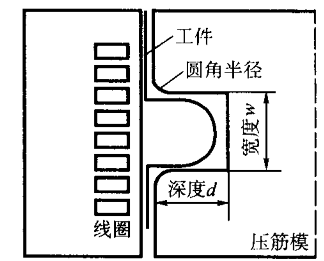
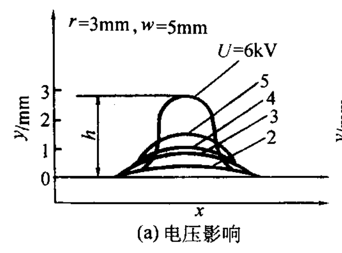


图 7.6-44 管坯内肋成形

图 7.6-45 为放电电压及压肋模圆角半径对肋成形的影响。由图可见，肋的成形深度随放电电压的升高及压肋模圆角半径的增大而增加，但电压的影响比圆角半径的影响大。当放电电压由 5 kV 升高到 6 kV 时，肋的深度明显增大。



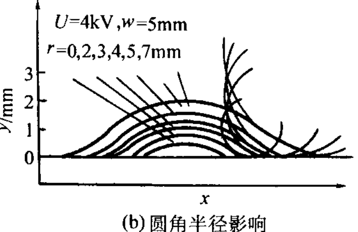


图 7.6-45 放电电压及压肋模圆角半径对肋成形的影响

(4) 管缩径加工方式及应用

用缩管方式进行缩口加工和成形锥形件时，可采用多次成形方案来减小缩口系数，如不考虑制件刚度，缩口系数可降至 0.4 以下；也可采用图 7.6-46 所示的施加轴向拉应力的成形方案，配合后续工序将成形件剖切为两半。

用缩管方式可加工的管坯直径可从 3 mm 到 2 m，壁厚可达 5 mm，可用于装配、成形和分离工序（见图 7.6-47），有关的工艺要求及参数见表 7.6-11。

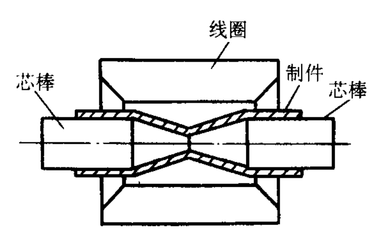


图 7.6-46 施加拉应力的缩口方案

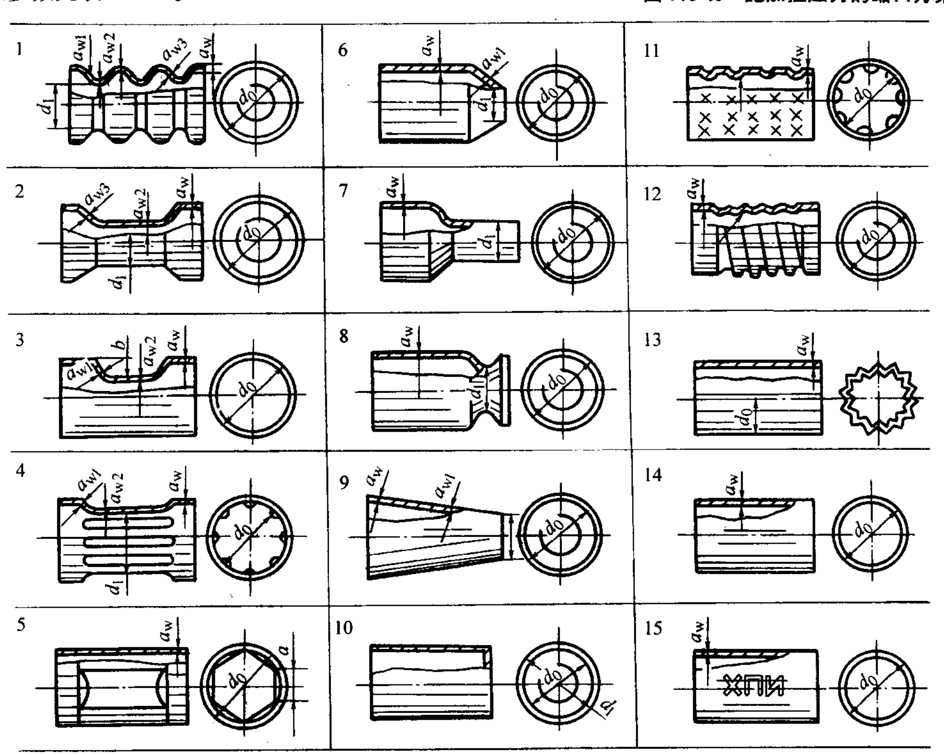


图 7.6-47 缩管加工方式的工艺应用



表 7.6-11　缩管加工的工艺要求

序号①	应用例	工艺要求、参数及特点	变形分布
1，8		缩径比 $d_1/d_0>0.8$	$a_{w1}>a_{w2}=a_w>a_{w3}$
2		缩径比 $d_1/d_0>0.9$	$a_{w1}<a_w$，$a_{w2}>a_w$
3	凹槽成形	槽深与管径比 $b/d_0<0.2$	$a_{w1}<a_w$，$a_{w2}>a_w$
4，5		缩径比 $d_1/d_0>0.9$，$a/a_w>5$	$a_{w1}<a_w$，$a_{w2}>a_w$
6，9	锥形件成形	缩径比 $d_1/d_0>0.9$	$a_{w1}<a_w$
7	缩口	缩口系数 $d_1/d_0>0.8$，$d_0/a_w\leqslant 10$	
8	翻边	翻边系数 $d_1/d_0>0.8$	
11～15	起伏、螺纹成形、来复线加工、整形、压印	管坯与芯棒间的间隙为（1～2）a_w，$d_1-d_0=$（1～2）a_w，变形部位曲率半径为（1～5）a_w	

① 序号与图 7.6-47 的序号相对应。

3.4　管状坯料的分离工序

管状坯料电磁成形能方便地实现各种成形分离工序，如冲孔、落料、修边、切断等，见图 7.6-48。其工艺要求为：

$d_1/a_w>8$，$a/a_w>8$，搭边（4～7）a_w，表面粗糙度 $R_z40\sim R_z20$，精度 2～4 级。

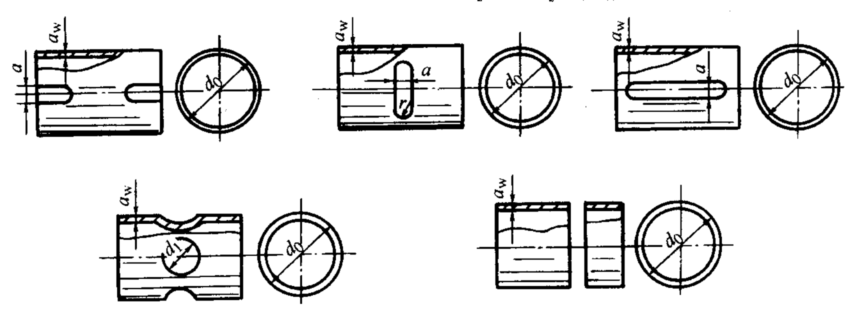


图 7.6-48　管坯分离工艺应用

4　板坯成形

平板坯料一般采用平面螺线圈或平板形集磁器进行加工。将一螺旋形扁平线圈对着平板坯料放置，当脉冲电流通过线圈时，电磁力将坯料推向模具，成形出工件（如图 7.6-49 所示）。这种成形方法可用于坯料成形、精整、冲裁等。

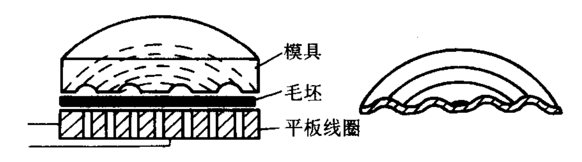
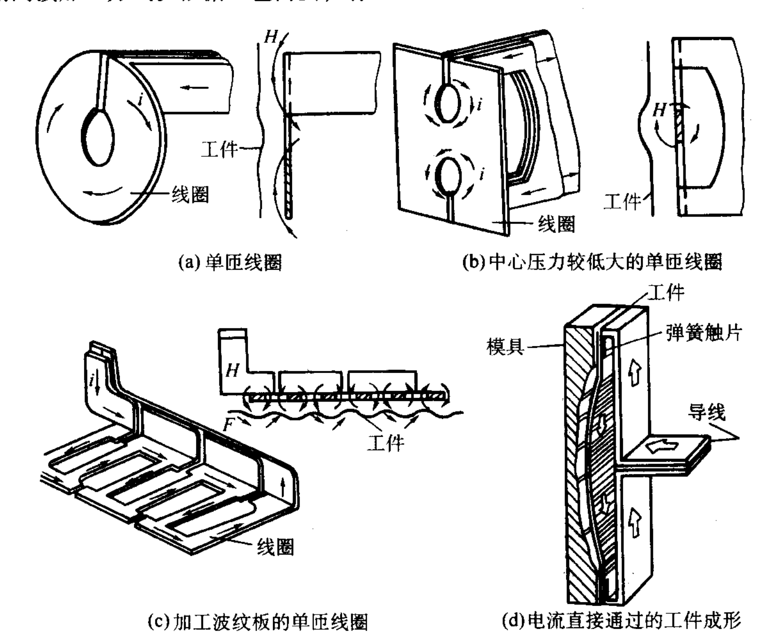


图 7.6-49　平板坯料成形

由于平面螺线圈的磁场分布极不均匀且线圈中部的磁场很弱，当成形工件的尺寸较小时，可采用多叠式线圈来增强线圈中部的磁场，或采用间接加工方式。根据工艺需要，有时也可采用单匝线圈或直接将电流通过工件的成形方案，如图 7.6-50 所示。



(a) 单匝线圈　(b) 中心压力较低大的单匝线圈　(c) 加工波纹板的单匝线圈　(d) 电流直接通过的工件成形

图 7.6-50　采用单匝线圈和直接将电流通过工件的平板坯料成形方案



4.1 平板坯料成形

平板坯料成形可分为自由成形和有模成形两种。自由成形主要用于精度要求不高的锥形件成形，有模成形常用于压印、局部压肋、压凹及曲面零件成形等。由于平板坯料磁脉冲力分布不均，尤其中心部位过小，往往影响零件质量。

（1）自由成形

影响自由成形中成形高度的因素比较多，图 7.6-51 ~ 56 给出了放电能量、坯料直径、压边力、凹模圆角半径以及坯料与线圈距离等对成形高度的影响。

1）电压对成形高度 H 的影响。电压对成形高度 H 的影响如图 7.6-51 所示。随着电压升高，成形高度 H 增大，两者呈线性关系。电压升高到一定程度后，坯料发生破坏。

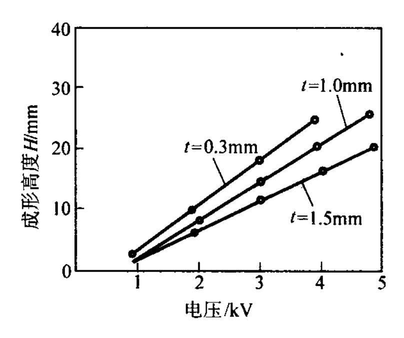


图 7.6-51 电压与成形高度 H 的关系（$C = 190\ \mu F$）

2）电容量对成形高度 H 的影响。电容量对成形高度 H 的影响如图 7.6-52 所示。随着电容量增大，成形高度 H 增加，两者呈近似指数曲线关系。

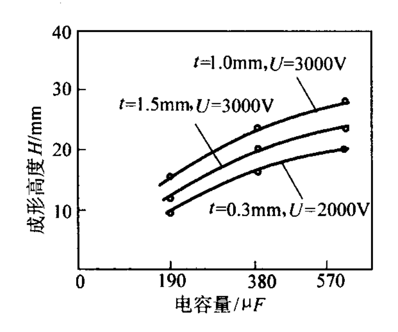


图 7.6-52 电压与成形高度 H 的关系（$C = 190\ \mu F$）

3）坯料直径对成形高度 H 的影响。坯料直径对成形高度 H 的影响如图 7.6-53 所示。随着坯料直径增大，成形高度 H 逐渐减小。当坯料直径增大到一定程度后，成形高度 H 不再降低。

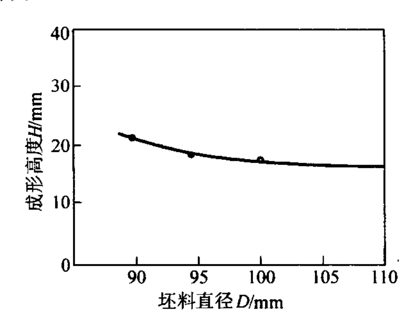


图 7.6-53 坯料直径与成形高度 H 的关系

（$U = 3\ kV$，$C = 90\ \mu F$，$t = 3\ mm$）

4）坯料与线圈之间的距离对成形高度 H 的影响。坯料与线圈之间的距离 S 对成形高度 H 的影响如图 7.6-54 所示。随着距离的增加，成形高度 H 显著减小。这说明随着成形距离的增加，磁场损失增大，加工效率降低。实际应用时应尽可能减小坯料与线圈之间的距离，以提高加工效率。

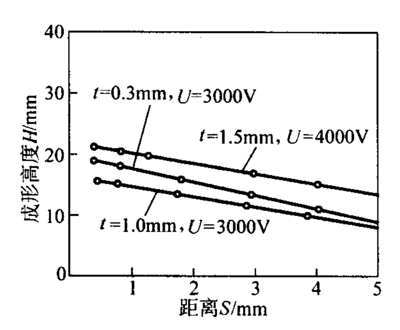


图 7.6-54 坯料与线圈之间的距离与成形高度 H 的关系（$C = 190\ \mu F$）

5）凹模圆角半径对成形高度 H 的影响。凹模圆角半径对成形高度 H 的影响如图 7.6-55 所示。可以看出，凹模圆角半径对成形高度 H 的影响不大，但对坯料的成形有重要的影响。当凹模圆角半径较小时，厚度 0.3 mm 的坯料在很低的电压下就会在凹模圆角处发生破坏；当凹模圆角半径很小且放电能量很大时，塑性变形基本限制在凹模圆角区，此时可实现冲裁加工。

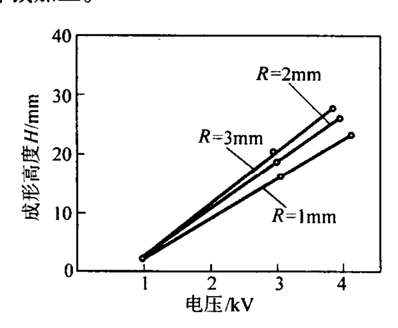


图 7.6-55 凹模圆角半径与成形高度 H 的关系

（$C = 190\ \mu F$，$t = 0.3\ mm$）

6）压边力。在不同的压边力情况下板料的成形结果如图 7.6-56 所示。压边力较大时，工件成形高度低，厚度变化较大；压边力较小时，零件成形高度明显增加，但零件出现内皱，这表明零件的拉深变形方式增大；压边力合适时，零件即可得到较大的成形高度，又可避免出现内皱，获得高质量的零件。

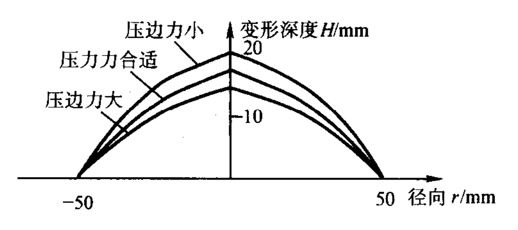


图 7.6-56 压边力对成形高度的影响

（2）有模成形

贴模性是影响有模成形零件质量的重要因素。为了保证零件的精度，在模具设计时，要考虑排气孔的设计，以保证板料与凹模间的空气在板料成形过程中顺利排出，必要时还配以抽真空系统。图 7.6-57 ~ 59 给出了放电能量、排气状况以及放电次数等对贴模性的影响。

1）放电能量对贴模性的影响。在放电电容一定的情况

下，放电电压对工件贴模性的影响如图 7.6-57 所示。显然随放电能量的增大，工件贴模效果趋好。平板线圈中心部位磁场力较小，当放电能量不足时，将难以保证坯料中心部分的贴模。

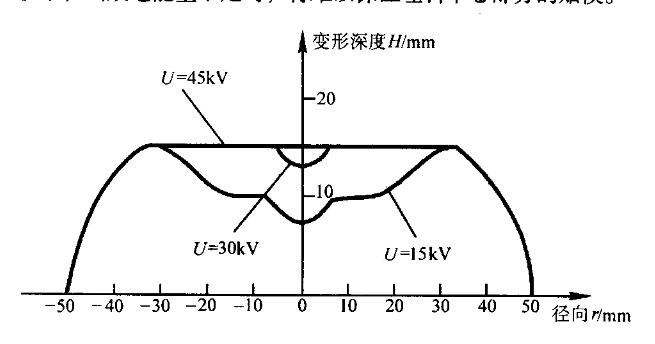


图 7.6-57 放电能量对贴模性的影响（$C = 2.7\ \mu F$）

2）排气条件对贴模性的影响。图 7.6-58 为排气条件对贴模性的影响。当排气孔数少时，因模膛内空气不能及时排出形成气垫，促使贴模效果不好。在模具设计时，应有足够的排气孔以保证空气的排出。为保证零件的表面质量，排气孔的直径应尽量小。排气孔的位置应设置在零件最后贴模部位。

3）放电次数。图 7.6-59 为放电次数对贴模性的影响。可以看出，放电次数增多有利于零件的贴模。

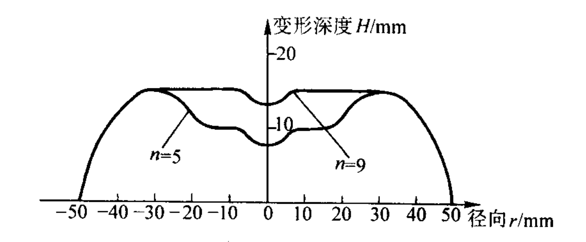


图 7.6-58 排气条件对贴模性的影响（$C = 2.7\ \mu F$）

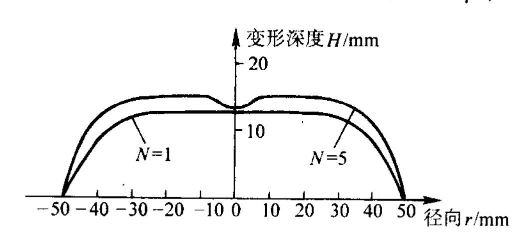


图 7.6-59 放电次数对贴模性的影响

（3）平板坯料加工方式及应用

受设备能量限制，板材电磁成形所加工工件的面积一般为 $10^{-4} \sim 0.02\ m^2$，板厚小于 5 mm。平板坯料电磁成形的应用例如图 7.6-60 所示，相关技术参数见表 7.6-12。

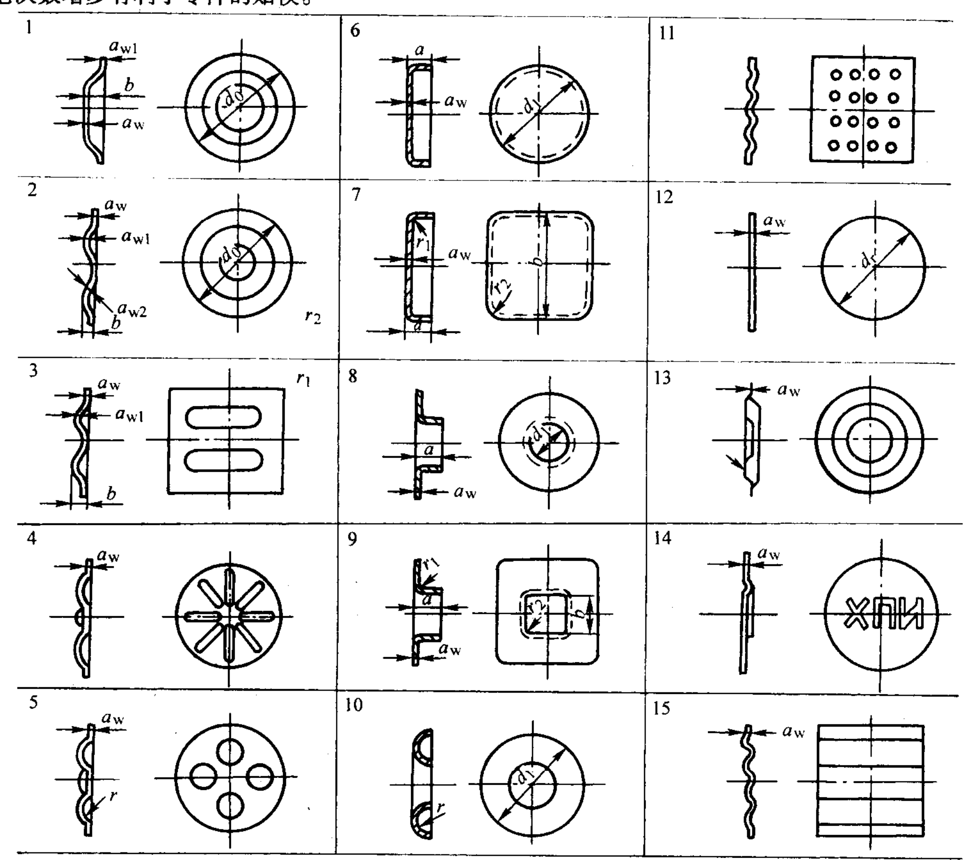


图 7.6-60 平板坯料加工方式的应用例

表 7.6-12 平板坯料加工的工艺要求

序号①	应用例	模具形式	工艺要求、参数及特点	变形分布
1	碟形件成形		外缘翻边，$b/d_0 < 0.2$	
2	环形件加强肋成形	凹模	拉深深度 $b < 15a_w$	$a_{w1} > a_{w2} = a_w$
3，4	纵向、径向加强肋成形	凹模	拉深深度 $b < 10a_w$	$a_{w2} < a_{w1} = a_w$



续表 7.6-12

序号①	应用例	模具形式	工艺要求、参数及特点	变形分布
5	压窝	凹模	$r=(2\sim15)\ a_w$	
6，7	圆形、矩形轮廓外缘翻边	凸模	$a/d_1<0.1$，$a/b<0.1$，$r_1>3a_w$，$r_2>5a_w$	
8，9	圆形、矩形孔翻边	凸模	$a<10a_w$，$r_1>3a_w$，$r_2>5a_w$，$a/d_1<0.2$	
10	环状端盖成形	凸模或凹模	$r/d_1<0.2$，$r<2a_w$	
11～15	起伏、校平、压印、波纹板成形	凹模	板坯与凹模的间隙为（0.5～1）mm，变形部位曲率半径（0.5～1）a	

① 序号与图 7.6-60 的序号相对应。

（4）板坯有模成形例

爆破片是压力容器、管道及其他受压密闭装置和设备的防超压安全附件之一。爆破片均由薄板成形，直径从几个毫米到几百毫米不等，传统的气压成形或液压成形难以保证其质量和性能，利用电磁成形工艺可得到优良的产品。

电磁成形采用单面模具。图 7.6-61a 是工件图，图 7.6-61b 是模具图。

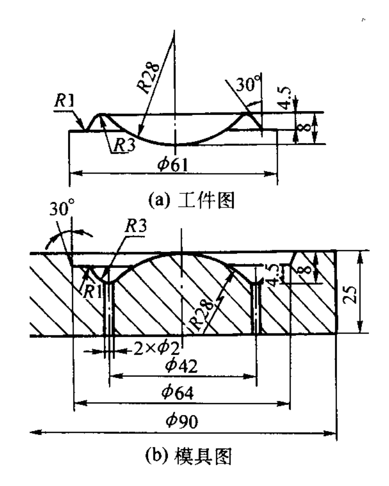


图 7.6-61

采用 14.4 kJ 的电磁成形机。充电电流为 2.5 A，最大充电电压为 5 000 V，安装 1～6 个 190 μF 电容器，最大充电时间 15 s。平板线圈外径为 90 mm，线圈骨架用强度较高的高分子尼龙棒（如图 7.6-62），导线采用带环氧玻璃丝绝缘层的矩形截面电磁线，截面尺寸为 5.5 mm×1.5 mm，其绝缘层耐高压 6 kV，线圈平面低于骨架端面 0.5 mm，用环氧树脂充填其间，以保证线圈和坯料间的间隙和增加线圈表面的绝缘性。线圈的每匝之间也留有适当的间隙，并充填环氧树脂，以起到紧固和保证绝缘的作用。

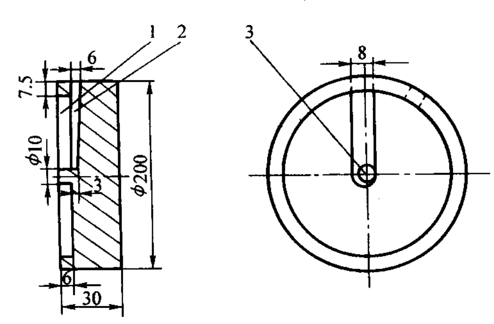


图 7.6-62 线圈骨架结构示意图
1—凹槽；2—引出孔；3—导线柱

对于导电能力很好的纯铝坯料，采用如图 7.6-63 所示的直接感应成形工装。工作时电容器对工作线圈 3 放电，放电瞬间在金属坯料 4 内产生感应电流，使预先储存在电容器内的电场能转化为磁场能，直接对坯料施加力，利用凹模 5 实现贴模成形。为了防止工作线圈受磁场力作用的向上运动，采用了模架 1 固定。

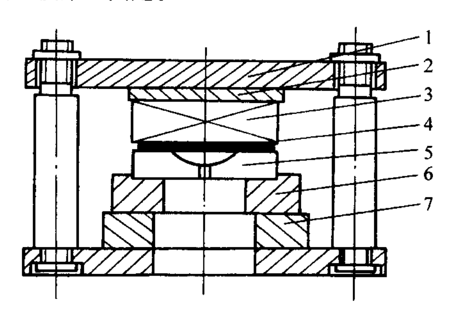


图 7.6-63 直接感应成形工装
1—模架；2、7—垫板；3—线圈；4—坯料；5—凹模；6—模座

对于导电性不好或导电性虽好但坯料厚度小于磁场渗透深度的薄板料，应该采用如图 7.6-64 所示的利用传压介质成形的工装。利用驱动片 4，弹性介质 5，将磁场能传递给坯料 6，通过凹模 7 实现贴模成形。

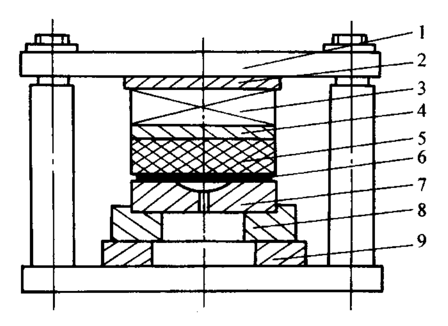


图 7.6-64 利用弹性介质成形的工装
1—模架；2，9—垫板；3—线圈；4—驱动片；5—弹性介质；6—坯料；7—凹模；8—模座

爆破片的成形工艺参数如表 7.6-13 所示。

表 7.6-13 爆破片电磁成形工艺参数

工艺参数 / 成形方法	材料	厚度 /mm	坯料直径/mm	电容量 /μF	电压 /kV
直接感应成形法	L2Y4	1.0	90	2×190	2.5
间接感应成形法	L2Y4	1.0	90	3×190	4.5



4.2 冲裁

电磁冲裁可在平板坯料上冲孔，尤其适合于小于 0.5 mm 的薄料或复合材料，可实现无毛刺冲裁。电磁脉冲冲裁装置如图 7.6-65 所示。加工时，线圈放电，磁场力使驱动片向下运动并压迫弹性传压介质（如橡胶或聚氨酯等），坯料在弹性传压介质及凹模刃口的压力作用下实现断裂分离。

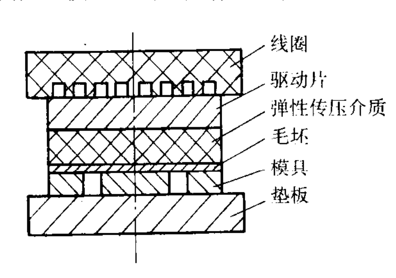


图 7.6-65　平板冲裁加工

（1）冲裁机理

在磁脉冲冲裁中，磁场力通过驱动片传递给橡胶，在橡胶中形成高压冲击波。冲击波在极短的时间（微秒级）内作用于坯料，这段时间只占坯料全部变形时间的一小部分，而坯料获得的动能使它在冲击波压力低于其变形抗力和冲击波压力停止作用后仍能继续变形，在坯料中形成较大的拉应力，而切应力是坯料自身向下运动形成的。这两种应力共同作用使坯料产生缩径和裂纹，最终断裂分离。

磁脉冲冲裁的分离机理与钢模冲裁及橡胶冲裁的分离机理有本质上的不同。钢模冲裁主要是靠剪切实现的，凸模和凹模刃口挤压材料一定深度后，刃口附近的材料产生剪切裂纹而使之断裂分离。橡胶冲裁时，板料在橡胶的持续作用下，在刃口处产生拉深、弯曲等复杂应力和应变，直到材料断裂。

（2）冲裁能量的影响因素

1）零件尺寸、橡胶厚度、搭边值对冲裁能量的影响见表 7.6-14。

表 7.6-14　零件尺寸、橡胶厚度、搭边值对冲裁能量的影响

影响因素	特　点	简　图
零件尺寸	冲孔： 随着冲孔尺寸的减小，所需能量增大。这是因为利用橡胶作为传压介质进行电磁脉冲冲孔时，橡胶要靠体积变形将坯料向凹模内挤入，当材料厚度一定时，凹模孔径越大，橡胶挤入越容易；凹模孔径越小，橡胶挤入凹模越困难，因此需要增大放电能量	冲孔能量 W/kJ：2.7、2.5、2.3、2.1、1.9、1.7 0、30、40、50、60、70 冲孔直径 d/mm
	落料： 随着直径增大，所需能量增加。落料与冲孔时不同，橡胶无需挤入凹模口，此时所需能量主要与工件的剪切面积有关	冲孔能量 W/kJ：0、2.0、4.0、6.0 10、20、30、40、50、60 落料直径 d/mm
橡胶厚度	电磁脉冲冲裁（冲孔、落料）时，橡胶厚度偏大偏小都不利，在确定条件下，存在一最佳厚度值，此时所需放电能量最低	冲孔能量 W/kJ：1.0、1.4、1.8、2.2、2.6、3.0 0、10、20、30、40、50 橡胶厚度 h/mm
搭边值	随着搭边值增大，所需的放电能量减小。这主要与磁脉冲冲裁中搭边的特殊作用有关，搭边值增大，橡胶在工件以外的作用面积增大，这有利于材料发生剪裂。因此，随着搭边值增大，所需冲裁能量减小	冲孔能量 W/kJ：1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0 橡胶厚度 35mm 凸模直径 60mm 凸模直径 51mm 凸模直径 26mm 0、3.5、5.5、7.5、9.5、11.5、13.5 搭边值 a/mm



2）橡胶状态　利用橡胶冲裁时，应将其置于容框内，使之在工作时尽可能处于三向压应力状态，这既能使橡胶产生较大的单位压力，也有利于提高橡胶的使用寿命。

表 7.6-15 为橡胶在不同状态时，冲孔所需能量。可见，在同样冲孔直径时，橡胶加容框后所需能量比自由状态时小。加上容框后，使橡胶的变形主要集中在凹模刃口部分，利于材料的分离。另外，容框相当于对橡胶施加了预紧力，有利于橡胶给出更大的单位压力。

在容框设计时，应在橡胶与容框间留有微小间隙，使橡胶在驱动片的作用下在垂直方向有微小位移，以保证冲击波压力的传递。

表 7.6-15　橡胶不同状态时的冲孔能量

凹模直径/mm	橡胶自由状态/J	橡胶密封状态/J
64	1 710	1 385
55	2 006	1 653

（3）冲裁加工方式及应用

板坯电磁成形的分离工序包括冲孔、落料、修边、切断等，见图 7.6-66。其工艺要求为：$d_1/a_w>8$，$a/a_w>8$，搭边（4～7）a_w，表面粗糙度 R_z40～20 μm，精度 2～4 级。

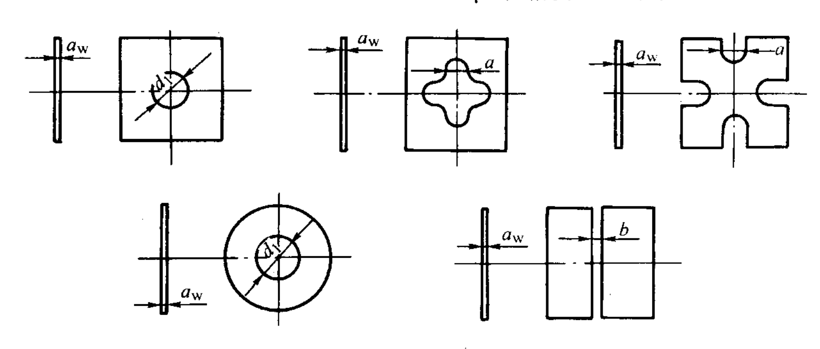


图 7.6-66　板坯分离工艺应用

4.3　框架零件成形实例

常规冲压方法需要制坯、翻边、成形、冲孔、切边等多道工序完成，工序多、模具复杂。采用螺线管线圈对外径 50 mm，壁厚 1 mm 的铝管（L_2Y）胀形，一次即可完成翻边、成形、冲孔工序。放电电压、电容及坯料热处理状态对成形效果有较大的影响。

框架类零件是电器仪表行业常用的典型冲压件。图 7.6-67 所示的框架零件在其一对矩形内壁上开有减轻孔，另一对断面成弧形，两端带有平面法兰，材料为工业纯铝 1060 或 1035。常规生产工艺需经下料、翻边、成形、冲侧孔、切边等 8 道工序完成，工序多、模具结构复杂。采用电磁成形工艺，可将翻边、成形、冲侧孔工序复合，模具数量减少，结构简单。

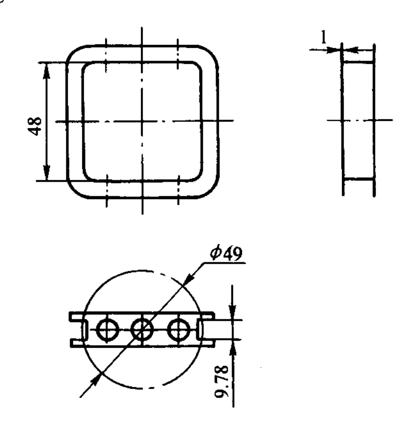


图 7.6-67　框架零件

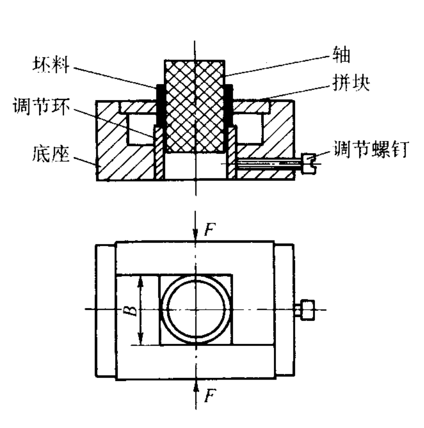


图 7.6-68　框架电磁成形工装示意图

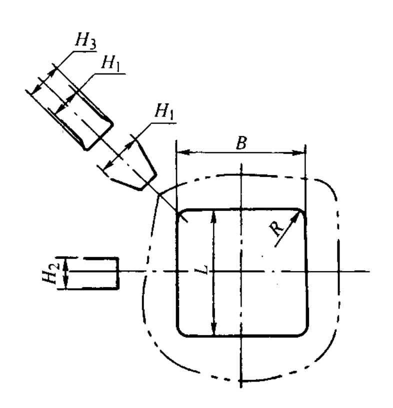


图 7.6-69　框架典型尺寸

成形设备为 14 kJ 电磁成形机，坯料选用外径为 50 mm、壁厚为 1 mm 的铝管 1060HX8，成形工装如图 7.6-68 所示，拼块 5、7 放在底座 1 中并用外力夹紧固定，坯料 6 与工作线圈 8 同轴 3 放入拼块中，通过调节环 2 调整管坯与拼块的轴向相对位置。

成形零件典型尺寸（见图 7.6-69）与电压、电容的关系如图 7.6-70、7.6-71 所示。

图 7.6-70 所示为放电电压及坯料热处理状态对变形的影响。转角口处贴模状态随电压的提高而变好，放电电压对直边中点靠模高度 H_2 影响的总趋势是随电压的增加靠模高度增大。即这部分贴模效果变差。因为电磁成形放电瞬间的脉冲磁场力作用时间极短，坯料是靠获得的动能即依靠惯性力驱动贴模。如果贴模时因能量过高，贴模速度过大，坯料贴模瞬间受到模具表面撞击引起的反作用力作用，产生反向

撞击变形，所以贴模效果随电压的增大而变坏。当然，倘若电压过低，不足以保证坯料贴模，则靠模高度 H_2 还是随电压的增加而变小。

转角根处高度 H_3、转角半径 R，均随电压的增大而减小。转角半径明显地存在有最小值 R_{min}，即使电压再继续增大，转角半径的减小也不明显。坯料经退火软化变形抗力下降，因此对应同一电压，退火坯料均可得到较小的 H_3 与 R。但是 H_2 尺寸例外，因为坯料退火后，屈服点下降，坯料的总体刚度降低，故而贴模瞬间的反向撞击变形增大，使直边中点靠模高度 H_2 随电压的增大而增大。所以，对于框架转角，电压提高使成形效果提高；而对于框架直边，电压提高成形效果降低。坯料状态对直边长度 B 的成形效果影响不大。

电容值对成形效果的影响如图 7.6-71 所示，电压取值范围在 3.9~4.2 kV 之间，因变化不大，因此横坐标用能量 E 表示。

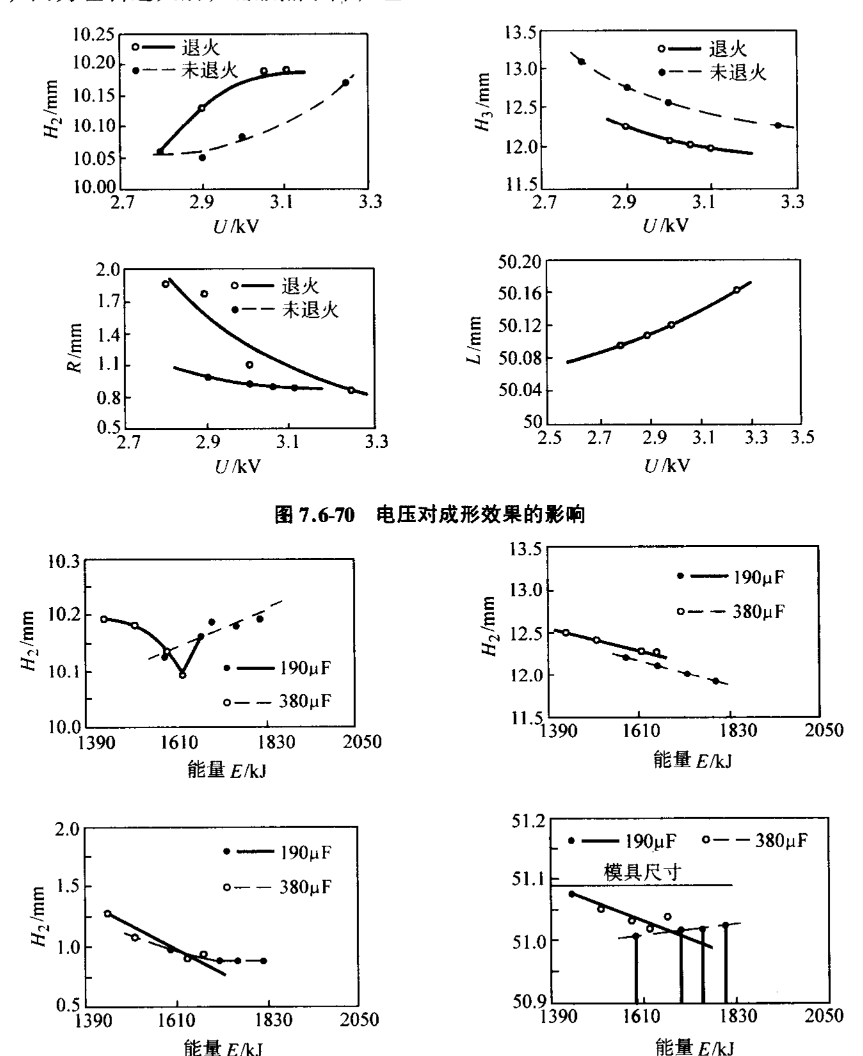


图 7.6-70 电压对成形效果的影响

图 7.6-71 电容值对成形效果的影响

电容值影响磁场压力作用时间的长短（磁场压力的脉宽）。对于同一能量，电容值对 H_3、R 的影响不大，电容值对边长 B 影响的结果明显可见。当放电能量小于 1 636 J（电压小于 4 150 V）时，在能量相同的条件下，电容值小时对变形更为有效。即对边长 B 而言，用小的电容（190 μF）时，才可能得到接近模具尺寸的框架。

电容对 H_2 的影响较为复杂。在电容值为 190 μF 时，随放电能量 E 的增加，H_2 先是减小随后又增大。其原因是当能量超过 1 636 J（电压大于 4 150 kV）时，容裕能量增大，反向撞击变形随值变大，使贴模情况随放电能量的增加而变坏。

5 电磁成形设备

5.1 设备组成及分类

电磁成形设备的组成见示意图 7.6-72，主要由四部分组成：

1）高压电源系统。由调压器、变压器、整流电路等组成。

2）储能系统。由数台脉冲电容器组成。

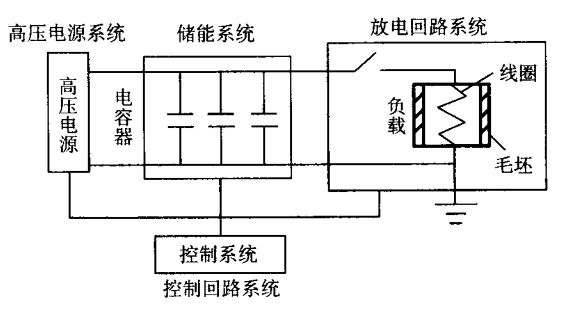


图 7.6-72 电磁成形设备组成示意图



3）放电回路系统。由高压放电开关、工作线圈及坯料组成。

4）控制回路系统。由操作台、仪表、控制元器件、触发电路等组成。

按工作频率 f 和自然频率 f'，电磁成形设备可分为三种：

低频设备：$f = 5 \sim 20$ kHz，$f' < 30$ kHz；

中频设备：$f = 20 \sim 50$ kHz，$f' = 30 \sim 80$ kHz；

高频设备：$f = 50 \sim 200$ kHz，$f' = 80 \sim 300$ kHz。

电磁成形设备的工作频率（或放电频率）对电磁成形工艺有重要影响，对不同的成形工艺要求，应选用不同工作频率的设备。一般原则是，较高放电频率的设备适用于冲裁、校形、联接或焊接等场合；较低放电频率的设备适用于变形量较大的胀形、缩口及其他成形场合。因此，三种类型的设备基本上可以满足不同的电磁加工工艺的要求。

电磁成形设备的工作频率与设备的电容值有关，且受设备固有电感及工作线圈电感的影响，大致有以下关系：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

式中，L 为放电回路的总电感；C 为设备的电容值。

5.2 国内外的电磁成形设备

表 7.6-16、7.6-17 为国外生产的部分电磁成形机概况，表 7.6-18 为国内生产的部分电磁成形机概况。

表 7.6-16　国外生产的部分电磁成形设备参数

设备型号（产地）	最大储能 /kJ	充电电压 /kV	电容 /μF	网路电压 /V	轮廓尺寸/mm	重量 /kg
М Ф М－2（俄罗斯）	12	5	1 200	—	1 750 × 900 × 1 900	1 000
М И У－15（俄罗斯）	15	5	1 200	220	1 320 × 1 180 × 1 210	900
М И М－20/1（俄罗斯）	20	21	90	220/380	1 870 × 1 840 × 1 985	2 410
М И У－20/3（俄罗斯）	20	20	—	220	1 640 × 2 060 × 1 950	2 970
С З П И（俄罗斯）	30	7	1 440	—	1 800 × 1 200 × 900	—
М И О М（俄罗斯）	14	5	40	—	1 300 × 800 × 1 800	—
У М Щ 5/5A（俄罗斯）	15	5	—	—	1 560 × 830 × 1 500	1 200
Ц Н И И Т М А Щ А（俄罗斯）	22.5	5	—	—	1 900 × 1 045 × 1 460	700
电磁成形机 R－1（德国）	5.5	19.1	30	220	1 100 × 1 500 × 900	900
电脉冲加工装置（德国）	4.1	20	20.5	—	—	—
电磁压机 Eimag（捷克）	7.5	10	150	380	1 300 × 1 380 × 975	800
Magneform（美国）	6	8	180	220	1 120 × 570 × 870	550
Magneform（美国）	12	8	220	220	1 100 × 1 200 × 850	1 200

表 7.6-17　俄罗斯生产的部分电磁成形设备参数

设备型号	最大储能/kJ	额定电压/kV	生产能力 /（工序/h）	电容器形式	换向器个数	重量/kg	占地面积 /m²	用　途
М И У-24	24	20	360	и к 25-12	1	2 200	12	加工有色金属和低碳钢
М И У-48	48	20	180	и к 25-12	2	4 100	30	加工有色金属和低碳钢
М И У-72	72	20	120	и к 25-12	3	5 900	35	加工有色金属
М И У-96	96	20	90	и к 25-12	4	7 700	40	加工有色金属
М И У-152	144	20	60	и к 25-12	6	10 300	60	加工有色金属及其合金的大型制品
М И У-240	240	20	36	и к 25-12	10	17 000	80	加工有色金属及其合金的大型制品

表 7.6-18　国内生产的部分电磁成形设备参数

单位及设备		最大储能 /kJ	充电电压 /kV	单个电容 /μF	网路电压 /V	开关形式	轮廓尺寸（长 × 宽 × 高） /mm
哈尔滨工业大学	设备 1	1.2	5	100	220	球间隙	430 × 360 × 520
	设备 2	14.4	5	190	220	球间隙	1 250 × 800 × 1 050
	设备 3	36	10	120	220	球间隙	



续表 7.6-18

单位及设备		最大储能/kJ	充电电压/kV	单个电容/μF	网路电压/V	开关形式	轮廓尺寸（长×宽×高）/mm
兵器部第59所	MF-16	16	10	120	220	火花隙	控制柜：700×600×1 600 储能柜及开关柜：1 000×750×1 700
中南工业大学	MFA-18-10	18	10	120	220/380	高压开关	控制柜：670×550×1 000 储能柜：1 360×800×1 400 操作台：1 320×495×1 250
北京机电所		30	10	120	220/380	球间隙	—
上海航天局		30	10	120	220/380	球间隙	—
牡丹江机电所		30	10	120	220/380	同轴开关	—
东北大学		20	10	80	220	球间隙	控制柜：480×370×880 储能柜：700×310×730 开关柜：400×320×430 成形操作台：810×620×830

编写：李明哲（吉林大学）
蔡中义（吉林大学）

参考文献

1 夏巨谌主编. 精密塑性成形工艺. 北京: 机械工业出版社, 1999

2 王同海编著. 管材塑性加工技术. 北京: 机械工业出版社, 1998

3 F. Dohmann, Ch. Hartl. Tube hydroforming-research and practical application. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 71: 174 ~ 186

4 韩英淳等. 汽车轻量化中的管材液压成形技术. 中国汽车工程学会 2003 学术会议论文集. 北京, 2003, 11

5 王仲仁主编. 特种塑性成形. 北京: 机械工业出版社, 1995

6 李明哲, 中村敬一. 基本的な成形原理の检讨 (板料多点成形法の研究 第 1 报). 日本平成 4 年度塑性加工春季讲演会论文集, 1992: 519 ~ 522

7 Li Mingzhe, Liu Yuhong, Su Shizhong et al. Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3-d surface sheet, Journal of Materials Processing Technology. 1999, 87: 277 ~ 280

8 K. Kitazawa. Incremental sheet metal stretch expanding with CNC machine tools, advanced technology of plasticity, Proc. of the 4th ICTP. Beijing, China: International Academic Press, Sept. 1993: 1899 ~ 1904

9 松原茂夫. 板材の逐次逆张出し·绞り成形. 日本平成 7 年度塑性加工春季讲演会论文集, 1995: 209 ~ 210

10 Ming-Zhe Li, Zhong-Yi Cai, Zhen Sui et al. Multi-point forming technology for sheet metal, Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129 (1-3): 333 ~ 338

11 李明哲, 中村敬一等, 多点成形における不良现象の产生及びその抑制 (板料多点成形法の研究 第 3 报). 日本第 43 回塑性加工连合讲演会论文集, 1992: 425 ~ 428

12 蔡中义, 李明哲, 付文智. 板料多点成形中压痕缺陷的分析与控制. 锻压技术, 2003, 28 (1): 16 ~ 19

13 中村敬一, 李明哲等. ねじれ形状の多点成形に关する实验的检讨 (板料多点成形法の研究 第 4 报). 日本第 43 回塑性加工连合講演会论文集, 1992: 429 ~ 432

14 李雪, 李明哲, 蔡中义. 使用弹性介质的多点成形过程数值模拟研究. 塑性工程学报, 2003, 10 (5): 21 ~ 25

15 蔡中义, 李明哲, 宋雪松. 无压边多点成形中起皱的分析与控制. 塑性工程学报, 2003, 10 (5): 14 ~ 19

16 余同希, 章亮炽. 塑性弯曲理论及其应用. 北京: 科学出版社, 1992

17 陈建军, 李明哲, 隋振等. 基于遗传算法的板材分段成形过渡区优化设计. 吉林工业大学学报 (自然科学版), 2001 (2): 12 ~ 16

18 姚建国. 几种典型的多点成形工艺方法的研究: [学位论文]. 长春: 吉林工业大学, 1999

19 Zhong-yi Cai, Ming-zhe Li. Multi-point forming of three-dimensional sheet metal and the control of the forming process, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2002, 79 (4): 289 ~ 296

20 李明哲, 蔡中义, 崔相吉. 多点成形——金属板材柔性成形的新技术. 金属成形工艺, 2002, 20 (6): 5 ~ 9

21 Cai Zhongyi, Li Mingzhe, Feng Zhaohua. Theory and method of optimum path forming for sheet metal, Chinese Journal of Aeronautics, 2001, 14 (2): 118 ~ 122

22 李明哲, 姚建国, 蔡中义, 李淑慧. 利用多点反复成形法减小回弹的研究. 塑性工程学报, 2000, 7 (1): 22 ~ 25

23 李明哲, 蔡中义, 刘纯国. 板材反复多点成形中残余应力的研究. 机械工程学报, 2000, 36 (1): 52 ~ 56

24 刘纯国. 板料多点成形控制系统及曲面闭环成形的研究: [学位论文]. 长春: 吉林工业大学, 1999

25 刘纯国, 李明哲, 蔡中义等. 大型三维板类件多点闭环成形的研究. 中国机械工程, 2000, 11 (12): 1326 ~ 1329

26 隋振, 李明哲, 刘纯国. 快速调形板料多点成形设备控制系统的研制. 塑性工程学报, 2003, 10 (5): 53 ~ 56

27 隋振, 李明哲, 蔡中义, 刘纯国. 多点成形控制系统总体设计及其关键技术. 吉林大学学报 (工学版), 2002, 32 (4): 20 ~ 25

28 李明哲, 付文智, 李湘吉等. 板材多点成形样机的研制. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32 (4): 62 ~ 64

29 Mingzhe Li, Wenzhi Fu, Yongsheng Pei et al. 2 000 kN multi-point forming press and its application to the manufacture of high-speed trains, Advanced Technology of Plasticity 2002, Proceedings of the 7th ICTP, Yokohama, Japan, 2002, 2: 979 ~ 984

30 付文智, 李明哲, 李东成. 630 kN 薄板多点成形压力机研究. 重型机械, 2002, 244 (4): 26 ~ 28

31 陈建军. 多点成形 CAD 与分段多点成形工艺的研究: [学位论文]. 长春: 吉林大学, 2001

32 蔡中义, 李明哲, 郭伟. 基于三角形网格的板壳类成形件坯料计算方法. 吉林大学学报 (工学版), 2002, 32 (2): 1 ~ 6

33 彭林法, 李明哲, 蔡中义. 板料成形中曲面拓展方法. 塑性工程学报, 2003, 10 (4): 30 ~ 33

34 戴昆, 苑世剑, 王仲仁, 方漪. 轴对称件多道次数控点成形过程的理论分析. 塑性工程学报, 1998, 5 (2): 26 ~ 32

35 T. J. Kim, D. Y. Yang. Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process, International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42: 1271 ~ 1286

36 李庆, 莫健华, 黄树槐等. 薄板无模分层成形技术. 锻压机械, 2001, 3: 9 ~ 11

37 G. Hirt, S. Junk, N. Witulski. Incremental sheet forming: Quality evaluation and process simulation. Advanced Technology of Plasticity, Proc. of the 7th ICTP. Yokohama, Japan: Japan Society for Technology of Plasticity, Oct. 2002, 1: 925 ~ 930

38 莫健华, 叶春生, 黄树槐. 金属板料数控无模成形及快速制模. 电加工与模具, 2002, 1: 15 ~ 18

39 方漪, 戴昆, 王仲仁. 板材数控增量成形过程的研究. 塑性工程学报, 1999, 6 (3): 49 ~ 55

40 K. Kitazawa, A. Nakajima. Cylindrical incremental drawing of sheet metals by CNC incremental forming process. Advanced Technology of Plasticity, Proceedings of 6th ICTP, Nuremberg, Germany: Springer, Sept. 1999, 2: 1495 ~ 1500

41 K. Kitazawa. Incremental sheet metal stretch expanding with

CNC machine tools, advanced technology of plasticity, Proc. of the 4th ICTP. Beijing, China: International Academic Press, Sept. 1993: 1899～1904

42 松原茂夫，网野广之，青山进，吕言. 板料无模成形装置［P］. 中国专利: ZL998000876, 2000-06-07

43 中国机械工程学会锻压学会编. 锻压手册，第2卷，冲压. 北京: 机械工业出版社，1993

44 王孝培主编. 实用冲压技术手册. 北京: 机械工业出版社，2001

45 朱九成，苏华. 无靠模旋压成形工艺. 现代制造工程，2002 (6): 40～41

46 卫原平，王轶为. 工艺参数对筒形件强力旋压过程的影响. 模具技术，2000 (4): 12～16

47 肖作义. 筒形件强力旋压新技术: 浮动芯模法. 锻压技术，1999 (5): 34～35

48 航空制造工程手册编委会. 航空制造工程手册: 飞机钣金工艺. 北京: 航空工业出版社，1992

49 吴诗惇. 金属超塑性变形理论. 北京: 国防工业出版社，1997

50 林兆荣. 金属超塑性成形原理及应用. 北京: 航空工业出版社，1990

51 王卫英，张中元，李靖谊. 板料气压成形过程中的数值模拟和压力优化设计. 航空工艺技术，1998，4: 8～10

52 戴宏性. 薄板超塑性胀形的金属流动分析. 金属成形工艺，2001，19 (4): 24～27

53 李园春，李淼泉，吴诗惇. 材料参数对超塑性恒压充模胀形过程影响的数值分析. 1997，18 (2): 183～188

54 黄翔，苏桂柱. 超塑性胀形最佳加压曲线的确定. 中国机械工程，1996，7 (5): 80～82

55 张凌云. 改善超塑性气压胀形零件壁厚分布的工艺方法. 金属成形工艺，2002，20 (4): 40～42

56 王刚，张凯峰，吴德忠. 钛合金波纹管超塑成形工艺研究. 锻压技术，2003 (4): 28～31

57 王明坤，张翔，丁泉. 钛合金环形气瓶超塑成形工艺. 航天制造技术，2002，1: 34～37

58 张凌云，祁桂根. 铝锂合金在航空业的应用及SPF/DB工艺进度. 金属成形工艺，2001，19 (3): 1～3

59 张杰，牛济泰，张宝友. LF6铝合金的超塑性和扩散组合工艺. 焊接学报，1996，17 (4): 219～223

60 于彦东，张凯锋，蒋大鸣. MB15超塑性镁合金扩散连接试验. 焊接学报，2003，24 (1): 64～68

61 徐先懂，宋述稳. SPF/DB在空心叶片制造中的应用. 金属成形工艺，2002，20 (6): 49～50

62 李春峰编著. 高能率成形技术. 北京: 国防工业出版社，2001

63 张俊秀，刘光烈主编. 爆炸及其应用技术. 北京: 兵器工业出版社，1998

64 吕炎等编著. 锻压成形理论与工艺. 北京: 机械工业出版社，1991

65 佟铮等. 大型超薄壁球壳无模爆炸成形. 内蒙古工业大学学报（自然科学版），2000，19 (1): 44～47

66 邓汉祥等. 大尺寸薄壁旋转零件爆炸成形. 爆破器材，1996，25 (6): 20～22

67 中国机械工程学会，中国模具设计大典编委会. 中国模具设计大典: 第3卷，冲压模具设计. 南昌: 江西科学技术出版社，2003

68 李洪涛，王绍安，邱春城等. 电磁成形工艺及其应用: 电加工，1999 (3): 36～41

69 黄尚宇，常志华等. 板坯电磁成形载荷计算方法及分布特性. 中国有色金属学报，1998，8 (3): 441～446

70 李春峰，赵志衡等. 电磁成形磁场力的研究. 塑性工程学报，2001，8 (2): 70～72

71 张守彬. 电磁成形胀管过程的研究及工程计算方法: ［学位论文］. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学，1990

72 Ludmila Kistersky. Welding process turns out tubular joints fast. American Machinist, 1996, 4: 41～42

73 王永志等. 管-杆磁脉冲连接工艺研究. 锻压机械，1991，1:12～14

74 初红艳，陆辛，潘风文等. 电磁冲裁成形与普通冲裁成形的分析比较. 锻压技术，2001 (1): 28～35

75 刘全胜，黄尚宇，常志华. 管件电磁冲裁各参数优化的研究. 金属成形工艺，2002，20 (1): 36～39

76 于连仲，朱炳钦，朱福民等. 框架零件电磁成形变形的研究. 机械工程学报，1995，31 (1): 72～77

77 雷艳，傅铭旺译. 管料电磁成形扩口时的外轮廓控制. 国外金属加工，1991，3: 36～43

78 邱春城，李洪涛. 电磁成形翻边过程的研究. 锻压技术，2001，2: 32～37

79 张士宏等译. 电磁缩管工艺的有限元分析. 国外金属加工，1994，1: 11～17

80 初红艳，费仁元，陆辛等. 电磁成形中板料厚度与变形深度的关系. 机械工程学报，2003，39 (3): 62～65

81 赵彬等. 板材电磁成形实验研究. 金属成形工艺，1995，2: 7～10

82 张士宏，尚彦凌，于连仲等. 爆破片电磁成形工艺研究. 锻压技术，2000，1: 28～32

83 于连仲等. 框架零件电磁成形研究. 锻压技术，1993，2: 33～37

84 訾炳涛，巴启先，崔建忠. 电磁成形设备的国内外概况. 锻压机械，1998，3: 8～10

85 陈文峰，黄尚宇，孟正华等. 电磁成形技术在铝合金成形中的应用前景，锻压装备与制造技术，2003，3: 40～43

86 陆辛，费仁元，初红艳. 柔性电磁成形机. 锻压机械，2001，5: 34～36

87 Yiochi Murakoshi, et al. Inside bead forming of aluminum tube by electromagnetic forming, J. Mat. Pro. Tech. 1998, 80-81: 695～699

88 Fenlon G. K, Daehn G. S. Modeing of electromagnetically formed sheet metal. Journal of materials processing technology, 1998, 7: 6～16

89 板材冲压手册编委会. 板材冲压手册. 北京: 国防工业出版社，1989

90 郑哲敏，杨振声等编著. 爆炸加工. 北京: 国防工业出版社，1981



中 国 材 料 工 程 大 典
CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON
第 21 卷 材料塑性成形工程（下）

第  篇

型材挤压成形

主 编 夏巨谌 闫 洪
编 写 夏巨谌 闫 洪
审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会



第 1 章　铝合金型材

1　铝合金型材的分类

1.1　分类原则

挤压型材的分类对选择合理的生产工艺和设备、设计与制造工模具以及解决挤压中的技术问题和生产管理问题等都有重要意义。

目前，铝合金挤压型材的品种规格大约有 5 万种以上，通常，可以根据以下三项原则或三个基本特征进行分类：

1）挤压型材的使用性质。

2）挤压型材纵截面的形状。

3）挤压型材横截面的形状和尺寸。

1.2　分类方法

按照第一个特征，铝合金型材可分为通用型材和专用型材。

根据第三个特征，通用型材一般可分为四组：直角型材、斜角型材、带圆角和圆弧的型材、圆头型材。

直角型材的外廓是由互相垂直的直线组成。斜角型材是由彼此成任意角度的直线组成。型材形成线间只要有一个角不是直角，就属于斜角型材。

型材至少须有一条形成线是等半径或变半径的弧线才属于圆弧型材。圆头形型材的一个或几个翼缘在端部有半径加大（圆头）。

所涉及的每组型材又可分成 7 个小组：条型材、角型材、T 字型材、工字型材、槽形型材、Z 字型材、任意截面型材，参见图 8.1-1。

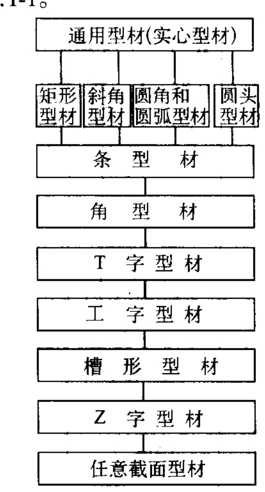


图 8.1-1　通用型材分类图

四类（组）通用实心型材（直角、斜角、圆角和圆弧、圆头）的主要品种如图 8.1-2～图 8.1-5 所示。

类别	参数
带材	$H=1.5\sim167$ $B=10\sim613$ $r=0.5\sim10$
角形型材	$H=10\sim120$ $B=10\sim250$ $S_1=1\sim35$ $S_2=1\sim55$
丁字型材	$H=5\sim330$ $B=5\sim480$ $S_1=1\sim32$ $S_2=1\sim32$
工字型材	$H=5\sim500$ $B=7\sim220$ $S_1=1.2\sim35$ $S_2=1.5\sim16$
槽形型材	$H=3\sim120$ $B=6\sim300$ $S_1=1\sim45$ $S_2=1\sim30$
Z字型材	$H=7.5\sim150$ $B=4\sim80$ $S=1.2\sim10$
异形型材	

图 8.1-2　实心断面直角型材的主要品种

带材

角形型材

丁字型材

工字型材

槽形型材

Z字型材

异形型材

图 8.1-3 实心断面斜角型材的部分品种



品种	断面图例
带材	
角形型材	
丁字型材	
工字型材	
槽型型材	
Z字型材	
异形型材	
弧形型材	

图 8.1-4　实心断面带圆角和圆弧型材的部分品种

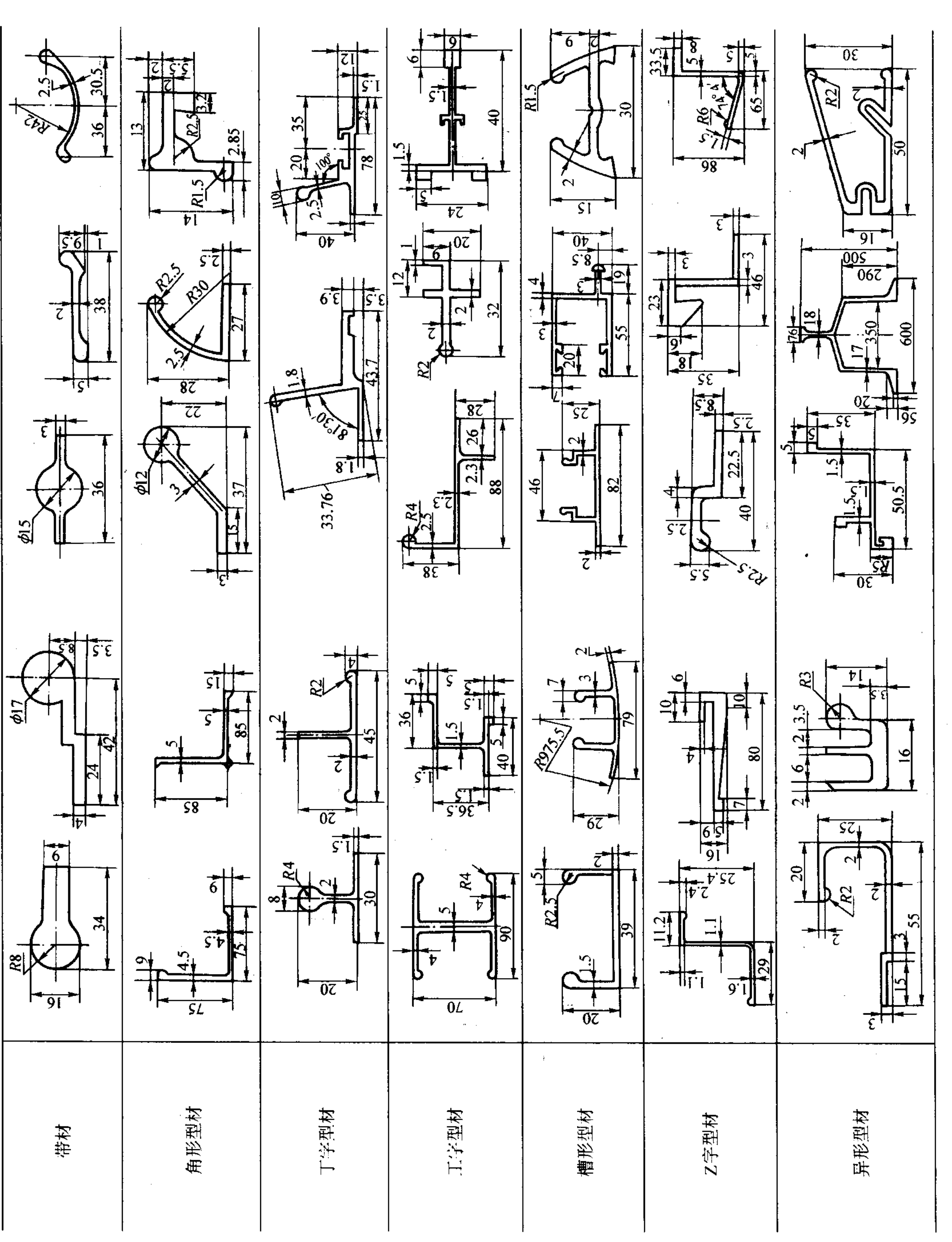


图 8.1-5　实心断面带圆头型材的部分品种



考虑到第二个和第三个特征，专用型材可分为四组：空心型材、变断面型材、壁板型材和建筑型材，参见图 **8.1-6**。

空心型材可分为四小组：具有一个圆形孔的；具有一个方形孔或矩形孔的；具有一个异形孔的；具有两个或多个异形孔的空心型材。根据用途不同，空心型材也可分为六个小组：合页型材、直升机用型材、冷冻型材、隔框型材、热交换器和电气工业用型材、建筑型材。空心型材的部分品种如图 **8.1-7** 所示。

变断面实心型材可分为两个小组：阶段变断面型材和逐渐变断面型材。第一小组的品种相当多，目前大约包括 **800** 个典型规格。第二小组型材的品种很少，目前不超过 **50** 个典型规格。

阶段变断面型材根据型材部分（薄端）的外形可分为 T 字形的、工字形的、槽形的、带弯边槽形的，Z 字形的和任意截面的型材，而大头部分（厚端）的外形可能是各种各样的。该种型材的特点是：大头端是一个整体，其横断面积超过其型材部分横断面积的 **3 ~ 10** 倍，大头部分长度通常为 **100 ~ 600** mm。图 **8.1-8** 例举了部分阶段变断面型材品种。

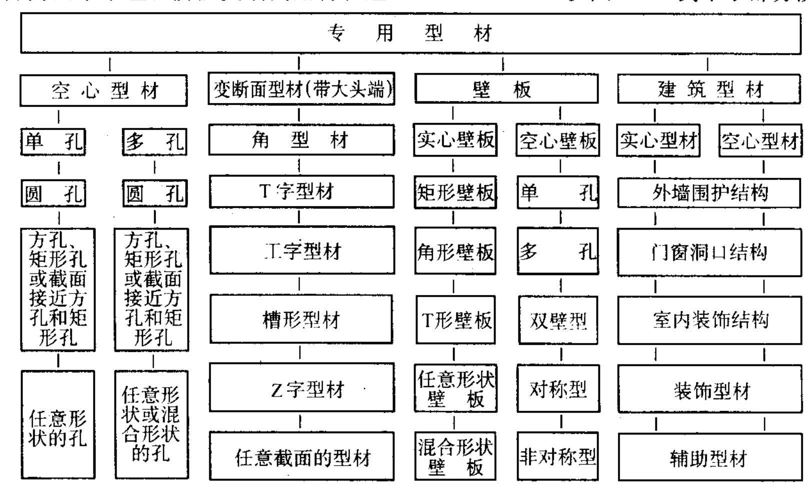


图 8.1-6　专用型材分类图

有一个圆形孔的型材

有一个方形孔或矩形孔的型材

有一个异形孔的型材

有几个内孔的型材

图 8.1-7　空心型材的部分品种

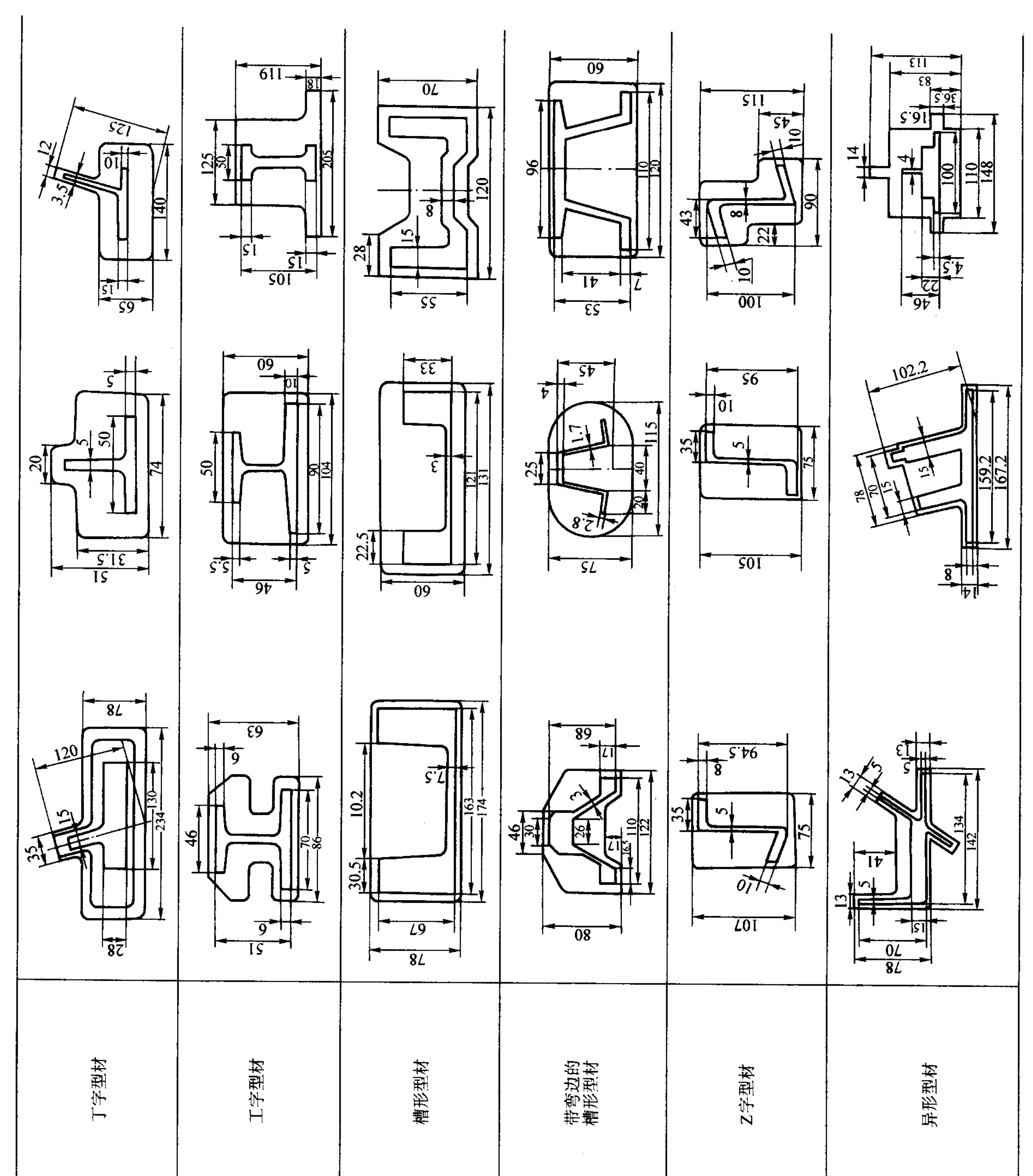


图 8.1-8　阶段变断面型材的部分品种

逐渐变断面型材（图 **8.1-9**）的断面通常有角形和槽形的，缘板厚度沿型材长度方向是变化的，而缘板的宽度不变或变化很小的。

铝合金带筋整体壁板已成为一种专用型材，主要用于航空航天、船舶、汽车、交通运输、建筑等工业部门作为比强度高的结构材料，可分为实心断面和空心断面两大类。按形状壁板型材又可分为对称的、不对称的壁板型材和直角形的、梯形的、丁字形的、十字形的和异形的，参见图**8.1-10**。

民用建筑型材在铝型材中所占比重最大，应用最为广泛，绝大多数用 **6063T5** 材料生产，具有壁薄、形状复杂、精度高、表面质量要求严等特点，故宜单独分为一类。按其形状可分为空心型材和实心型材，按其用途可分为外墙围护结构、门窗洞口填充结构、室内装饰结构、装饰型材和辅助型材等。

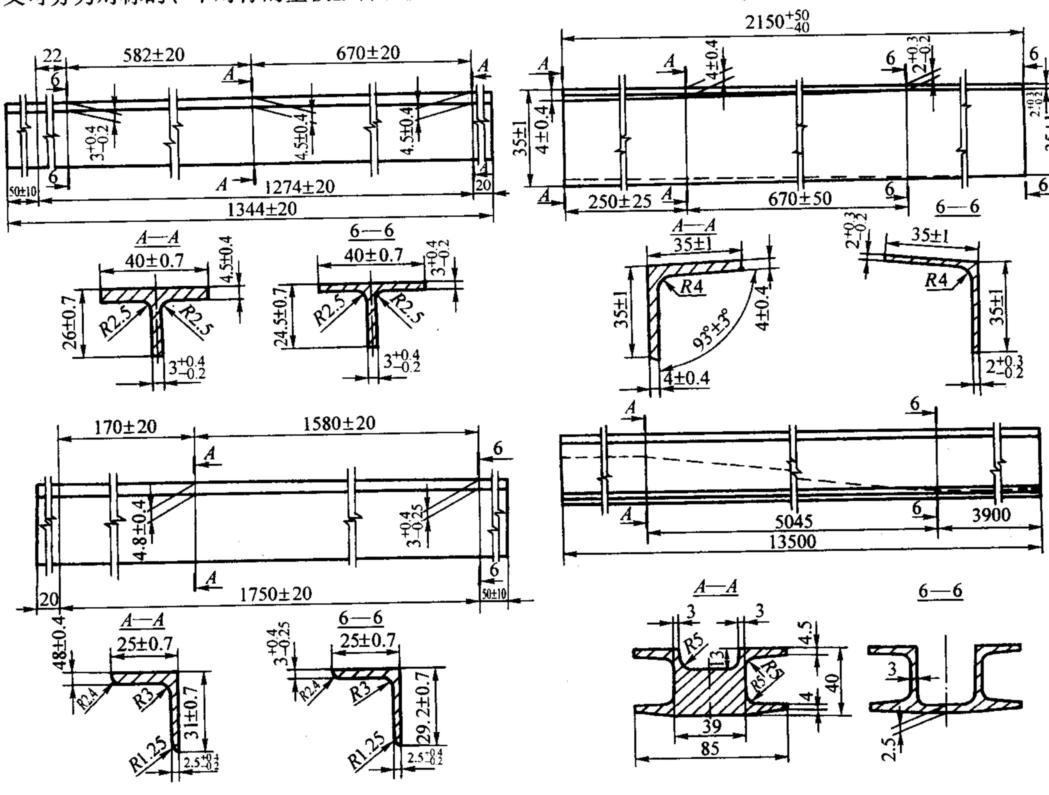


图 8.1-9　渐变断面型材的部分品种

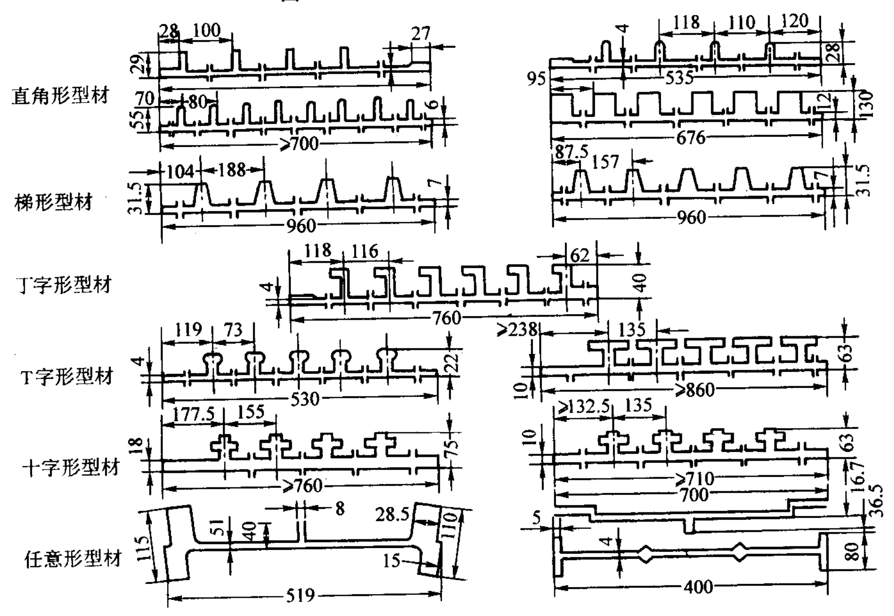


图 8.1-10　带筋板壁型材举例

2　铝合金型材断面的设计方法

采用挤压工艺生产铝型材，产品尺寸精度高、表面光洁、材料利用率高、生产效率高。实现铝合金型材的挤压生产，其关键是型材的断面设计，下面围绕影响型材挤压的几个主要因素进行分析。

2.1　断面形状的复杂性

根据型材的断面形状可分成三大类，即实心型材、半空心型材及空心型材，见图 8.1-11。



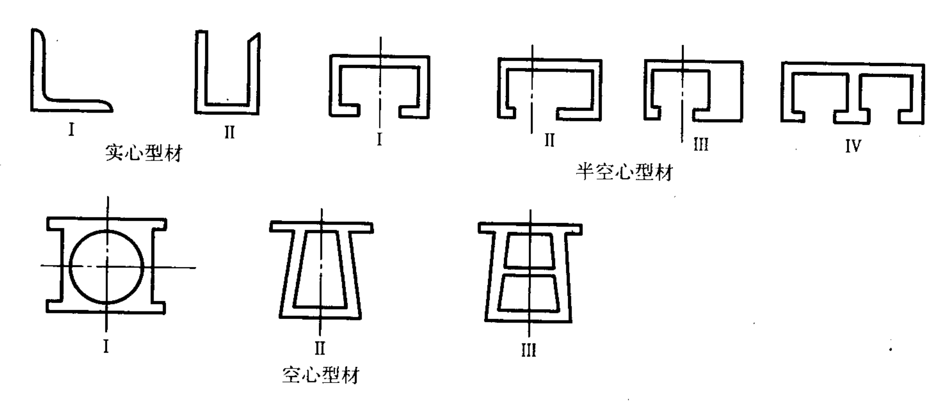


图 8.1-11 型材（按断面形状）分类图

1）实心型材，即一般的角形、槽形等型材。

2）半空心型材，根据断面形状又可分为三级：①半空心型材Ⅰ级，空间部分和将空间部分围起来的型材壁厚，从开口处中心线看是左右对称的；②半空心型材Ⅱ级，从开口部分中心线看左右是不对称的；③半空心Ⅲ级，从开口部分看是左右对称的，与不对称的二个半空心型材。

3）空心型材根据断面形状也可分三级：

① Ⅰ级空心型材，空心部分是圆的，直径较小，断面形状是对称的，或内径较小，外形是不对称的。②Ⅱ级空心型材，除Ⅰ级以外的，外接圆不大于 ϕ130 mm，只有一个空心部分，而且空心部分是非圆形的。③Ⅲ级空心型材。除Ⅰ、Ⅱ级以外所有的空心型材，壁厚是均一的，其空心断面是完整或多孔的，即圆、正方、长方、六角、椭圆、梯形等。

但上述三个级别没有包括某些专门用途的空心型材。

除了断面复杂性之外，还要考虑其形状因素，形状因素就是型材断面周长与单位质量之比（或周长与断面积之比），即

$$n = \frac{S}{A} = \frac{S}{W} \qquad (8.1\text{-}1)$$

式中，n 为形状因素；S 为型材断面周长；W 为型材的单位质量；A 为型材断面面积。

综合上述，如以 C 表示型材外接圆直径，那么 SC/A（$=nC$）就是一个反映挤压难易程度的指数，不难看出，当外接圆直径 C 不变，形状越复杂，即指数越大，型材就越难挤压。

2.2 挤压系数

为使挤压型材具有一定的变形量，同时又不致于挤压困难，合理的选择挤压系数是很重要的。一般来说纯铝的挤压系数可达 300，6063 合金可达 200，硬铝可选在 20～60 之间。有时可用变形率来表示。

$$\varepsilon = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \qquad (8.1\text{-}2)$$

式中，ε 为变形率；A_0 为铸锭断面积（挤压筒断面积）；A_1 为挤压制品断面积。

通常认为 ε 在 95% 以上是经济合理的。

2.3 断面大小

型材断面大小用外接圆来衡量，外接圆越大，所需要的挤压力就越大。一般来说，每台挤压机上能挤压出的最大外接圆的型材不是固定不变的，它与挤压筒直径有关，如 20MN 挤压机上的挤压筒直径一般为 ϕ170～ϕ200 mm，最大的可为 ϕ220 mm，挤压型材的最大外接圆一般比挤压筒直径小 25～50 mm，挤压空心型材时则应更小一些。

2.4 型材壁厚

某一特定型材壁厚最小值取决于型材的外接圆直径的大小、合金成分和形状因素等。

壁厚与合金的挤压难易程度有关系。如 6063 合金壁厚取为 1 mm 时，则 6061 合金就应取为 1.5 mm 左右，而 7075 合金则应取为 2.0～2.5 mm 左右。

壁厚选择除与合金有关外，还与外接圆直径、断面形状等有关。型材的外接圆尺寸或宽度尺寸越大，设计的厚度也应越大，一般情况下型材的宽厚比（b/t）以小于 30 为宜；当 $b/t > 50$ 时就比较难于挤压了，当 $b/t > 100$ 时，属特别难于挤压成形的型材，需要采取一些特殊的技术措施，才能保证产品质量和使挤压过程得以顺利进行。断面形状对挤压难易程度的影响可参见图 8.1-15。越难挤压的断面，要求有较大的壁厚，较小的宽厚比和较小的挤压系数。

2.5 包围空间面积的设计

在型材的断面形状方面，凡有三方面包围，一面开口的部分，称之为空间面积，这个空间从模具方面来看是个悬臂梁，当悬臂梁细而深时，模具破损率就大，甚至很难制造出来，即使能制造出来也很难挤压出型材。表 8.1-1 为美国的型材断面形状挤压难易程度的分级，由图 8.1-12 所示，按 F/C^2 或 $E + F/C^2$ 公式计算，哪个数值大取哪个，然后与表 8.1-1 中的数值对照，比表上数值大的定为半空心型材，小的则定为实心型材。

表 8.1-1 美国断面形状与挤压难易程度的分级

开口部分深度/mm	1级		2级		3级	
	合金 A	合金 B	合金 A	合金 B	合金 A	合金 B
0.76～1.27	1	1	1	0.75	1	0.5
1.27～1.6	2.0	1.5	1.5	1.0	1.125	0.75
1.6～3.18	2.5	2.0	2.0	1.5	1.5	1.125



续表 8.1-1

开口部分深度/mm	1 级		2 级		3 级	
	合金 A	合金 B	合金 A	合金 B	合金 A	合金 B
3.18～6.35	3.0	2.5	2.5	2.0	1.875	1.5
6.35～12.7	3.5	2.75	3.0	2.5	2.25	1.875
12.7～25.4	4.0	3.0	3.5	2.5	3.0	2.25
25.4～38.1	3.5	2.75	3.0	2.0	2.25	1.5
38.1～63.5	3.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.125
63.5 以上	2.25	2.0	2.0	1.5	1.5	1.125

注：合金 A 牌号：1060、1100、3003、5052、5154、5254、6061、6062、6082、6005、6063、6101、6251、6403、7004、7104、7005、7003 等。
　　合金 B 牌号：2011、2014、2017、2117、2024、5083、5086、5454、5456、6066、7001、7075、7178、7079、8091 等。

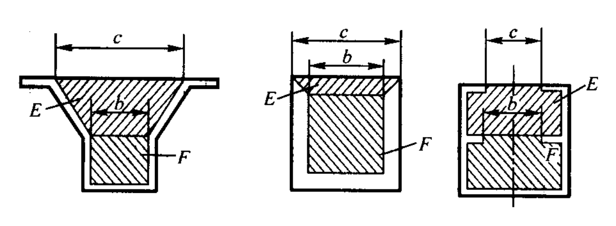


图 8.1-12　半空心型材断面图

2.6　直角间的圆角半径

凸出的直角上的过渡半径是很重要的，过小时在模子上会发生应力集中，而凹形的直角则在模孔入口处易于磨损，因此，应尽量避免尖角。像 6063 一类挤压性能良好的合金，其最小圆角半径可取 $R=0.4$ mm，其他合金应取 0.6 mm。

2.7　断面尺寸公差

型材的断面尺寸公差应根据产品的加工余量、使用条件、型材挤压的难易程度、合金牌号和形状的部位来确定，一般来说，在有关的技术标准中或在用户提供的图样中规定。对某些挤压难度大的型材，可改变形状，或增大工艺余量、尺寸公差来减少挤压的难度，挤压出近似要求的挤压制品，然后整形或加工到使用形状与尺寸。

此外，在设计时除了要考虑共同的设计要素外，还要考虑一些特殊设计因素。例如，对长度有要求的型材，必须考虑形位公差。阶段变断面型材要求大头部分与型材部分的断面比例控制在一定范围内，目前这个比例已达到 10 左右，此比例越大，挤压难度就越大。又如对整体带筋壁板型材的宽厚比、立筋的对称性及空心型材对合金成分的选择等等都有严格的要求，在设计型材时必须仔细计算和评估。

3　挤压型材常用铝合金及特性

3.1　常用铝合金化学成分

挤压型材所采用的铝合金的化学成分如表 8.1-2 所示。

表 8.1-2　挤压型材用铝合金的化学成分（质量分数）　%

合金牌号	主要成分										杂质 ≤									
	Cu	Mg	Mn	Ni	Fe	Si	Zn	Ti	Cr	Be	Fe	Si	Cu	Mn	Ni	Zn	Ti	Mg	其他杂质 每种	其他杂质 总和
1035											0.30	0.30	0.05	0.025	—	0.1	0.15	0.05	0.02	0.05
3021			1.0～1.6								0.7	0.6	0.2			0.1	0.2	0.05	0.05	0.1
5A06		5.8～6.8	0.5～0.8					0.02～0.10		0.000 2～0.005	0.4	0.4	0.1			0.2			0.05	0.1
6063		0.4～0.90				0.3～0.7					0.5		0.1	0.1		0.2	0.15		0.05	0.1
6A02	0.1～0.5	0.45～0.90	0.15～0.35			0.5～1.2					0.5					0.2	0.15		0.05	0.1
2A12	3.8～4.9	1.2～1.8	0.8～0.9								0.5	0.5			0.1	0.3	0.1		0.05	0.1
2A70	1.9～2.5	1.4～1.8		0.8～1.3	0.8～1.3			0.02～0.10				0.35		0.2		0.3			0.05	0.1
2A06	3.8～4.3	1.7～2.3	0.6～1.0					0.02～0.10		0.000 2～0.005	0.5	0.5						0.1	0.05	0.1
7A04	1.4～2.0	1.8～2.8	0.2～0.6	0.1			5.0～7.0		0.1～0.25		0.5	0.5							0.05	0.1

3.2 常用铝合金分类

作为挤压型材包括其他塑性成形加工的铝合金，主要地可按强度要求即按抗拉强度的高低分为：低强度（$\sigma_b <$ 294 MPa）、中等强度（$\sigma_b = 294 \sim 441$ MPa）和高强度（$\sigma_b >$ 441 MPa）铝合金。

1）低强度铝合金。它包括工业纯铝、3A21、5005、5A02、5A03、5086等热处理后不强化的铝合金，其半成品在退火状态下和冷作硬化后使用。某些铝-镁-硅合金，例如6063、6061，也属于低强度铝合金。但是这些合金热处理后可强化。这些合金的型材在淬火和人工时效或自然时效后使用。这些合金具有良好的可焊性和高的抗蚀性。上述合金在冷作硬化状态下进行熔焊时，焊缝区和靠近焊缝区的强度明显降低。因此，对于制造等强度的结构来说，焊接区的壁板部分应该加厚。

2）中等强度的合金。它可以分为两组：热处理不强化铝合金，5A05、5A06、5B06和热处理强化铝合金：6A02、2A11、2A70、2A06等。第一组合金的半成品只是在退火状态下使用，具有良好的可焊性和高抗蚀性。第二组合金的半成品在淬火和自然时效或人工时效后使用。该组合金的抗蚀性和可焊性是不同的。铜含量限制在0.1%以下的2A02合金，属于高抗蚀性和可焊性合金，而2A11合金的抗蚀性和可焊性则低。

3）高强度铝合金。它包括7A04和2A12等在热处理时可急剧强化的铝合金。7A04合金的半成品在淬火和人工时效后使用，而2A12合金半成品通常在淬火和自然时效后使用。这组合金的抗蚀性不高，必须采用专门的保护方法（包铝、阳极氧化、涂油漆层）。7A04合金的一般抗蚀性比2A12合金略微高一些。但是2A12合金具有很高的塑性性能和热强性。

7A04、2A12以及2A06合金主要用于制造承力结构所需要的壁板。

7A04合金制造的结构可在不超过100℃的温度下长期工作。例如，飞机的蒙皮、桁条、隔框、大梁、建筑上用的承力构架，载重汽车的框架、车身，铁路车厢的骨架和地板等。

利用2A06合金制造150～250℃温度下工作的型材结构。2A06合金的大型型材和壁板在淬火和自然时效状态下，与2A12合金不同，它没有晶间腐蚀和腐蚀破裂现象。

2A06合金可用于制造蒙皮、大梁、隔框，在使用时承受剧烈加热的其他结构零件。

2A70、2A50、5A05、5A06合金主要用于制造承受中等负荷结构的壁板，2A70和2A50合金在淬火和人工时效后使用，5A05和5A06合金在退火后使用。可用这些合金制造铁路车厢的框架和车身、焊接油箱、建筑物上承受载荷的吊棚、隔板、船舶的甲板、上层建筑和隔板等。

采用淬火和自然时效状态下的6A02和6063合金制造装饰壁板和民用建筑结构。在这种状态下，上述合金具有高抗蚀性，能很好的抛光和阳极化处理。此外，在某些情况下，利用5A06和5A03合金制造民用建筑结构。

在某些情况下，采用1035工业纯铝和3A21合金壁板制造建筑结构用的装饰部件。

3.3 常用铝合金及其特性

1）1035合金。1035合金是杂质含量在0.7%以下的工业纯铝，其中主要杂质是铁和硅。铁和硅以及某些其他金属杂质能略微提高强度，但显著地降低合金的塑性和导电性能。工业纯铝在许多介质中都具有高化学稳定性，超过了其他高标准电位的金属。铝的化学稳定性高是因为在铝的表面上产生一层薄而致密的氧化膜。铝中杂质含量越少（特别是铁和硅），其抗蚀性越高。实际上只有镁和锰不降低铝的抗蚀性。

1035合金的半成品在退火和热挤压状态下供应。但是，不管什么样供应状态，挤压型材的最后加工工序是拉伸矫直，可在辊式矫直机上矫直。矫直时，强度性能略有提高，但塑性剧烈降低。

此外，在冷变形时合金的导电性能稍有提高。因此在型材性能要求严格时，则需要考虑矫直时上述性能的变化。

当提高温度时，1035合金的强度性能下降，而塑性则急剧升高。当温度低于零度时，合金的强度和塑性性能都显著提高。

2）3A21合金。3A21合金是Al-Mn二元系中的变形合金。它具有高抗蚀性，实际上与1035合金的抗蚀性没有差别。3A21合金的半成品能够很好地进行气焊、氢原子焊、氩弧焊和接触焊。焊缝的抗蚀性与基体金属相同。在冷状态和热状态下合金的变形性能好，热变形的温度范围很宽（320～470℃）。该合金用热处理方法不能强化，合金型材在退火或热挤压状态下供应。

变形温度和变形速度对3A21合金变形抗力的影响要比工业纯铝小很多。

3）6063合金。6063合金是Al-Mg-Si系合金中的典型代表，具有特别优良的可挤压性和可焊接性，是建筑门窗型材的首选材料。它的特点是在压力加工的温度-速度条件下，塑性性能和抗蚀性高；没有应力腐蚀倾向。在焊接时，其抗蚀性实际上不降低。

6063合金在热处理时剧烈强化。合金中的主要强化相是MgSi和AlSiFe。如果6063合金挤压型材在退火状态下的抗拉强度为98～117.6 MPa，那么在淬火和自然时效后的抗拉强度可提高到176.4～196 MPa；此时相对伸长率下降不大（由23%～25%下降到15%～20%）。合金在160～170℃下经过人工时效可以得到更大的强化效果，此时，抗拉强度提高到269.5～235.2 MPa。但是，在人工时效时，塑性性能更剧烈下降（$\delta = 10\% \sim 12\%$）。淬火与人工时效之间的间隔时间对6063合金（在人工时效时）的强化程度有显著的影响，随着间隔时间由15 min增加到4 h，抗拉强度和屈服强度降低到29.4～39.2 MPa。人工时效时的保温时间对6063合金半成品的力学性能没有重大影响。

4）6A02合金。普通的6A02合金属于Al-Mg-Si-Cu系合金。它在压力加工的温度-速度条件下，以及在室温下具有很高的塑性性能。

生产6A02合金挤压半成品时，虽然其锰含量比较少，但在热处理后却能保持着未再结晶的组织，因此，可以显著提高强度性能。和6063合金一样，6A02合金在热处理时急剧强化，其主要强化相为Mg_2Si和W（$Al_xMg_5Si_4Cu$）。

淬火后用自然时效的方法可以提高抗拉强度，该性能与退火状态下的相比可提高一倍，而淬火后再人工时效的大约可提高两倍。但是，在人工时效时塑性性能却明显下降（相对伸长率大约降低1/2，而相对压缩率降低2/3以上）。6A02合金的典型力学性能如表8.1-3所示。

表8.1-3 在不同状态下6A02合金的力学性能

合金状态	力学性能			
	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	ψ/%
退火	127.4		24	65
淬火及自然时效	225.4	117.6	22	50
淬火及人工时效	323.4	274.4	12	20

6A02合金与6063合金不同，6063合金无论在自然时效

状态下，还是在人工时效状态下都具有高抗蚀性，而6A02合金在人工时效状态下的抗蚀性明显下降，并出现晶间腐蚀倾向。6A02合金中的铜含量越高，则抗蚀性下降越多。

在腐蚀过程中，随着合金中铜含量的增加，强度损失的剧烈程度也增大，例如，如果铜含量为0.26%时，合金经过6个月试验以后（用30%的NaCl溶液喷溅），其抗拉强度降低25%，其相对伸长率却降低了90%。所以为提高抗蚀性能，通常把合金中的铜含量控制在0.1%以下。

6A02合金可以点焊、滚焊和氩弧焊。焊接接头的强度为基体金属强度的60%～70%。焊接后淬火和时效可使焊接接头的强度达到基体金属强度的90%～95%。

6A02合金的变形抗力与变形温度的关系如图8.1-13所示。

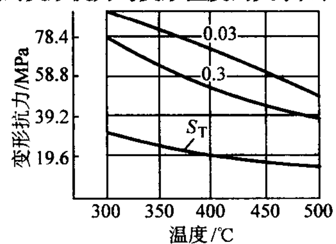


图8.1-13 6A02合金的变形抗力与变形温度和变形持续时间的关系曲线
（曲线旁的数字表示变形持续时间，s）

5) 5A06合金。5A06合金属于Al-Mg-Mn系合金。无论在室温下，还是在高温下，它都具有很高的塑性，在各种介质中，包括在海水中都具有很高的抗蚀性。该合金的良好抗蚀性和可焊性使它在造船工业中得到广泛应用。该合金的焊缝具有高的强度和塑性性能。在室温下，焊接接头的强度可达到基体金属强度的90%～95%。

尽管提高温度时，镁在铝中的溶解度显著增加，但是5A06合金在淬火时的强化效果却非常微小，因此5A06合金也和其他马格纳里型合金（5A02、5A03、5A05）一样，都属于热处理不强化的铝合金。

5A06合金半成品通常是在退火状态下供应。在较低的温度下（310～335℃）进行退火，并在空气中冷却。当退火温度较高或者在热挤压状态下供应半成品时，如果他们在使用时需要加热到60℃以上，则过饱和固溶体将发生分解，沿晶粒边界析出β（Al_3Mg_2）相质点，因而急剧地提高了合金的应力腐蚀和晶间腐蚀倾向性。如果在高温加热之前先经过冷变形时，那么过饱和固溶体分解的倾向性将增大。因此，对于需要进行冷变形（例如矫直）的半成品，进行低温退火具有特殊的意义。

像对1035和6063合金所指出的那样，当变形持续时间减少时，5A06合金的变形抗力则显著提高。

表8.1-4中列有5A06合金毛料在热变形温度下的塑性性能。

表8.1-4 5A06合金毛料在热变形温度下的塑性性能

合金状态	塑性性能	温度/℃				
		300	350	400	450	500
铸造的	A_k/J	2.3	2.1	1.6	1.2	1.6
	δ/%	15	19	11	9	8
均匀化的	A_k/J	5.4	5.8	1.9	4.6	3.1
	δ/%	8	18	19	20	19
变形的	A_k/J	46	50	50	23	20
	ψ/%	74	83	85	93	90
	δ/%	42	56	60	65	73

6) 2A70合金。2A70合金属于复杂的Al-Cu-Mg-Ni-Fe系合金，它是一种热强铝合金，近来在高温工作的结构中获得了十分广泛的应用。合金在热状态下能够很好的变形，变形的温度范围为350～470℃。2A70合金通过热处理可以剧烈强化。主要强化相是S（Al_2CuMg）相。热挤压型材经过淬火和人工时效后，合金的抗拉强度可以达到421.4～441 MPa，屈服强度可达294～372.4 MPa。因此，该合金的力学性能接近于高强度铝合金的性能。

2A70合金的挤压型材在淬火和人工时效状态下没有腐蚀破裂倾向。但是，合金的一般抗蚀性不高。因此，该合金型材最好进行阳极化处理或者涂上油漆。

该合金可以满意地进行点焊、滚焊和切削加工。淬火和人工时效状态的（在195±5℃，保温9～12 h）2A70合金壁板型材的力学性能列于表8.1-5。

表8.1-5 2A70合金壁板型材力学性能

试样的切取方向	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%
顺着底板	406.7	343	13
横着底板	411.6	347.9	11
沿筋条高度	372.4	333.2	7

在热变形温度下变形的2A70合金毛料的塑性性能如下：

温度/℃	300	350	400	450	500
A_k/J	3.8	20	27	27	16
ψ/%	56	72	80	89	80
δ/%	30	45	49	66	52

7) 2A12合金。2A12是应用最广泛的一种硬铝型合金。和本组的其他合金一样，它属于Al-Cu-Mg-Mn系四元合金。

2A12合金可以用热处理方法剧烈强化。主要强化相是S（Al_2CuMg）和$CuAl_2$。合金在热状态和冷状态下均能很好的变形。热变形可以在很宽的温度范围内（由350℃到450℃）进行。无论在退火状态下还是在淬火状态下，合金都能在室温下进行变形。

淬火和自然时效后半成品的力学性能在很大程度上取决于预加工的条件。例如，用铸锭挤压的壁板和型材，保留未再结晶组织（挤压效应），热处理后的强度性能具有最大值：σ_b = 450.8～490 MPa。用预变形的毛料挤压的型材，经过热后，其强度性能降低很多：σ_b = 392～421.4 MPa，它大致和轧制厚板的强度性能相同。

挤压时，挤压系数的大小对挤压型材的力学性能也有很大的影响。当挤压系数为9～12时，强度性能达到最大值。因此，大型型材的强度指标通常比用大的挤压系数所挤压的

小断面型材高。

在生产板厚度不同的型材时，其力学性能也有差别。由厚缘板上切取的试样，其 σ_b 和 $\sigma_{0.2}$ 的数值比由薄缘板上所切取的高。

如果用含铜量和含锰量为上限（4.5%～4.85% Cu; 0.65%～0.85%Mn）的合金生产挤压半成品，并将挤压温度提高到 430～460℃时，那么在塑性指标没有明显下降的情况下，其强度性能大约可提高 10%。

2A12 合金的抗拉强度和屈服强度也和自然时效的时间有关。强度的提高主要是在第一昼夜内，当继续时效时，强度性能的增长就不大了（图 8.1-14）。因此，试样淬火后经过 1～2 昼夜进行试验。

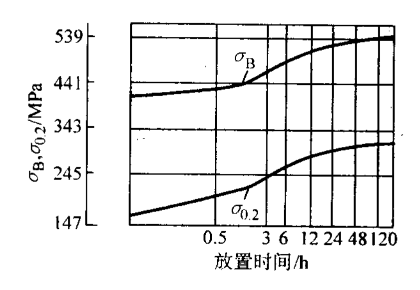


图 8.1-14 自然时效的时间对 2A12 合金强度性能的影响

淬火和时效的半成品，由于冷变形的结果，其强度性能（特别是屈服强度）得到了显著提高。

2A12 合金挤压半成品在淬火和自然时效状态下抗蚀性低，甚至在短时间加热到 150℃上时，抗晶间腐蚀性能急剧下降。将淬火的半成品进行人工时效（加热到 190℃，保温 6～8 h）时，可以提高抗蚀性和强度性能（特别是屈服强度），但是，在这种情况下，却大大降低了塑性。例如，相对伸长率降低了 1/2～2/3。

因此，当必须采用人工时效时，所有工艺操作（弯曲、矫直）都应当在自然时效以后进行完毕，对成品零件只进行人工时效。

2A12 合金薄壁型材和壁板的纵向和横向力学性能的各向异性很小。当型材的厚度增大时，随着挤压时挤压系数的减小，其各向异性增大并一直保持到高温。在加热温度下的保持时间实际上对各向异性的大小没有影响。

下面列出了 2A12 合金毛料在热变形温度下的塑性性能。

在铸造状态下：

温度/℃	300	350	400	450	480	500
ψ/%	50	54	62	75	62	40

在变形状态下：

温度/℃	300	350	400	450	480	500
ψ/%	64	65	77	83	82	82
δ/%	25	25	30	32	39	45

2A12 合金可以进行点焊和滚焊，但氩弧焊和气焊的效果不好。尽管焊接接头的强度系数具有中等数值（60%～70%），但该合金在熔焊时，在焊缝处经常出现结晶裂纹。因此，不用 2A12 合金制造密封结构，该合金的半成品（其中包括型材和壁板）通常用铆接方法连接，很少采用点焊连接。

8）2A06 合金。2A06 合金和 2A12 合金一样，是 Al-Cu-Mg-Mn 系四元合金的代表。该合金在热处理时的主要强化相如同 2A12 合金一样，也是 S（Al_2CuMg）和 $CuAl_2$ 相，但是，在 2A12 合金中没有的 Al_3Ti 相，对 2A06 合金的强化作用也具有一定影响。

该合金在热状态和冷状态下均能很好的变形，最适宜的热变形温度范围为 400～470℃，2A06 合金挤压型材和壁板在室温下的力学性能与上述的 2A12 合金大致相等。

2A06 合金属于热强性硬铝型合金，与 2A12 合金所不同的是 2A06 合金半成品的高温下，无论在自然时效状态下或在人工时效状态下，都具有近似的强度性能。此外，2A06 合金的型材和壁板在自然时效状态下比 2A12 合金的型材和壁板具有更高的抗蚀性。因此，2A06 合金壁板在自然时效状态下使用。

2A06 合金的主要优点是在自然时效状态下的强化速度比 2A12 合金低。这可以使 2A06 合金壁板比 2A12 合金壁板经过更长的时间进行冷加工（例如矫直、弯曲）。

在可焊性方面，2A06 合金超过了 2A12 合金。但是，在焊接时，靠近焊缝区合金的抗蚀性明显下降。因此，也像 2A12 合金一样，不用 2A06 合金制造密封结构，其半成品中主要是用铆接方法和点焊方法进行连接。

9）7A04 合金。7A04 合金是一种强度最高的铝合金，因此，在生产壁板为型材时应用广泛，其比强度是决定的因素。该合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 四元素，用热处理方法可使合金剧烈强化。主要强化相是 $MgZn_2$ 和 Al_2MgZn_3 相。

与 2A12 和 2A06 合金不同，7A04 合金挤压半成品只能在淬火和人工时效状态下供应。因为 7A04 合金在自然时效状态下的抗蚀性能低。

此合金的特点是淬火的温度范围宽（460～480℃）；淬火前在上述温度范围内改变加热温度时，合金的力学性能没有影响。但是 7A04 合金与其他合金相比，它对从炉内向冷却介质的转移时间具有更高的敏感性。当转移时间由 3～5 s 增加到 20 s 时，抗拉强度下降 9.8～10.7 MPa，屈服强度降低 29.4～39.2 MPa。

在 135～145℃温度下，保温 16 h 进行人工时效处理，可以得到强度性能最高的挤压半成品。淬火与人工时效之间的放置时间对 7A04 合金挤压产品的力学性能没有重大影响。

挤压时。挤压系数的大小对 7A04 合金的影响，与 2A12 合金相似。例如，在挤压阶段变断面型材时大头部分和型材部分的抗拉强度之间的差别达到 49 MPa。在屈服强度之间也有大致相同的差别。

对缘板厚度差别很大的型材，各向异性在屈服强度和相对伸长率数值方面表现得特别明显。等壁厚型材和壁板的各向异性小很多。

挤压 7A04 合金时和挤压 2A12 合金时一样，如果采用含锌和镁量为上限（6.0%～6.9%Zn 和 2.4%～2.8%Mg）的合金、将挤压温度提高到 420～450℃，那么强度性能可以稳定地提高 19.6～29.4 MPa。

7A04 合金可以进行点焊，但不能进行氩弧焊和气焊。像 2A12 合金一样，在熔焊时，7A04 合金在焊缝区有产生晶间裂纹的倾向。因此，在半成品（厚板、型材和壁板）连接时，常用铆接方法，而对于薄板可以采用点焊方法连接。

4 变形铝合金的挤压性能

可挤压性能的涵义是指合金以高的流出速度与变形程度和低的压力挤压的相对能力。

此值与合金的化学成分以及型材的外形有关。有的研究者以 6063 合金为 100 个单位，与其他的合金相比较。此法由于挤压条件的不同，得出的结果也不一样。下面给出一个可挤压性能 Z 与挤压过程基本因素数值间的关系式：

$$Z = mI_n v_t \frac{C}{\sqrt{p}} \tag{8.1-3}$$

式中，m 为比例系数；v_t 为流出速度，m/min；p 为合金的变形抗力，MPa；C 为型材断面的复杂程度系数。

同样也取 6063 合金的可挤压性为 100，则按式（8.1-3）计算出的最广泛应用的铝合金的可挤压性列于表 8.1-6。

表 8.1-6　部分工业铝合金的可挤压性能（平均值）

合　金	V_t/m·min^{-1}	p/MPa	Z 点 数		
			棒材　条材	简单型材	复杂型材
			易挤压合金		
1050	75	18	200	160	120
3A21	60	20	180	145	110
			中等挤压合金		
6063	30	35	100	80	60
7005	12	50	70	55	42
5A03	7	60	50	40	30
			难挤压合金		
2A11	4.5	75	35	28	21
2A12	2.5	100	18	14	11
7A04	2.0	110	13	11	8
5A06	1.7	120	10	8	6

由表可见，按可挤压性能数值大小 Z 可分为三组：易挤压合金（$Z>100$）；中等挤压合金（$Z=100\sim50$）；难挤压合金（$Z<50$）。

比较不同铝合金型材挤压条件，可以确定出一个变形抗力与流出速度之间的近似经验关系式：

$$v_t = f(1/p^2) \tag{8.1-4}$$

可挤压性能除了与合金的特性有关外，还与型材断面形状的复杂程度有关。这是由于变形不均匀性增加，会导致挤压力增大，流出速度减小。型材的复杂程度一般是用型材的周长与断面积或质量之比来表征，此比值被称为形状系数。也可以将铝型材根据其挤压的难易程度分成若干组。图 8.1-15所示的型材为挤压性由易到难的顺序。但是，用形状系数来表征型材的复杂程度只是在型材断面形状比较简单时才与实际结果符合。随着断面形状的复杂化，此比值关系被破坏。因此式 8.1-3 中的型材断面复杂程度用一个系数 C 来反映：对棒材和条材 $C=1$；对等壁厚对称实心断面的型材 $C=1.25$；对不等壁厚非对称空心型材 $C=1.65$。

型材类别	型材形状类型	示　　例
A	简单断面棒材	
B	异形断面棒材	
C	标准型材	
D	简单实心型材	
E	半空心型材	
F	薄壁型材	
G	舌比大的型材	
H	管材	
J	简单空心型材	
K	多孔空心型材	
L	外翅片空心型材	
M	内翅片空心型材	
N	大腔空心型材	

图 8.1-15　铝型材挤压难易程度排列表

表 8.1-7 中所列数据，可以根据变形抗力值来确定新的铝合金的流出速度和可挤压性，而不必进行挤压试验。用此表中的数据还可以评价用不同合金获得型材的可能性和挤压的相对难度。

可挤压性能对一种合金来说也不是一个固定不变的特性，而与许多冶金因素有关，主要的影响因素有：化学成分、铸锭的热处理制度、晶粒度的大小等。部分铝合金的挤压指数及可焊接挤压性能见表 8.1-7。

表 8.1-7　铝合金挤压与焊接性能的评价

合　金	挤压指数	可否进行焊接挤压
1060	150	可
1100	150	可
1200	150	可
2011	30	否
2014	20	否
2017	20	否
2024	15	否
3003	100	可
5052	60	否
5056	20	否
5083	20	否
5086	25	否
5056	20	否
6061	60	可
6063	100	可
6066	40	可
6101	100	可
6463	100	可
7001	7	否
7004	10	可
7003	80	可
7075	10	否
7079	10	否
7178	7	否

编写：夏巨谌（华中科技大学）
闫　洪（南昌大学）

第2章　铝合金型材挤压工艺基础及成形过程数值模拟

1　铝合金型材挤压时的金属变形规律

1.1　正挤压时金属变形的基本阶段

铝合金型材挤压一般是在卧式挤压机上正向挤压，它同立式正向挤压相似，可以分为三个基本阶段：开式挤压阶段，坯料在轴向压力下被镦粗，消除坯料与挤压筒的间隙，且坯料的前端开始进入凹模孔，在此阶段挤压力直线上升至最大值；稳定挤压阶段，坯料金属通过模孔变形成为型材，此阶段，也叫平流挤压阶段，当挤压力达到最大值，金属开始从模孔流出瞬间即进入此一阶段。一般来说，在此阶段中金属的流动相当于无数同心薄壁圆管的流动，即铸锭的内外层金属基本上不发生交错或反向的紊乱流动，锭坯上外层或中心层的金属流出模孔后仍处于制品的外层或中心层。在平流阶段，锭坯在同一横断面上的金属质点均以同一速度或保持一定的速度进入变形区压缩锥。靠近挤压垫片和模子角落处的金属不参与流动而形成难变形的阻滞区或死区，在此阶段中挤压力随着锭坯的长度减少而下降；挤压终了挤压阶段，或称紊流挤压阶段，在此阶段中，随着挤压垫片与模孔入口间距离的缩小，迫使变形区内的金属向着挤压轴线方向由周围向中心发生剧烈的横向流动，同时，两个死区中的金属也向模孔流动，形成挤压加工所特有的“挤压缩尾”等缺陷。在此阶段中，挤压力有重新回升的现象。

1.2　正挤压实心件的金属流动情况

为了了解正挤压实心件的金属流动情况，可将圆柱体毛坯切成两块，见图 8.2-1。在其中的一块剖面上刻上 5 mm × 5 mm ~ 20 mm × 20 mm 的正方形网格，将拼合面涂上润滑油，再与另一块拼合在一起放入挤压凹模模腔内进行正挤压。当挤压至某一时刻时停止挤压，取出试件，将试件沿剖分面分开，此时可以观察到坐标网格的变化情况，见图 8.2-2。由图中坐标网格的变化情况，可以对金属流动情况作如下分析：

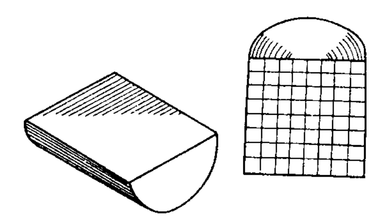


图 8.2-1　毛坯上的坐标网格

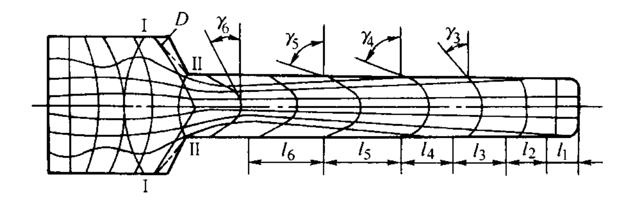


图 8.2-2　正挤压实心件的网格变化情况

1）横向坐标线在出口处发生了较大的弯曲，且中间部分弯曲更剧烈，这是由于凹模与被挤压毛坯表面之间存在着接触摩擦，使金属在流动时外层滞后于中层的缘故。被挤毛坯的端部横向坐标线弯曲不大，这是由于该部分金属原来就处在凹模出口附近，挤压时迅速向外挤出，受摩擦影响较小。横向坐标线的间距从挤出部分端部开始逐渐增加，即 $l_3 > l_2 > l_1$，这说明挤出金属的纵向拉伸变形愈来愈大；而当达到某定值 l_5 时，间距 l_5 不再变化，说明此时的变形已处于稳定状态。

2）纵向坐标线挤压后也发生了较大的弯曲。如果把开始向内倾斜的点连成Ⅰ-Ⅰ线，把开始向外倾斜的点连成Ⅱ-Ⅱ线。Ⅰ-Ⅰ线与Ⅱ-Ⅱ线之间所构成的区域为剧烈变形区。Ⅰ-Ⅰ线以左或Ⅱ-Ⅱ线以右坐标线基本上不变化，说明在这些区域内金属不发生塑性变形，只作刚性平移。

3）正方形网格经过出口以后，变成了平行四边形，这说明金属除发生拉伸变形以外，还有剪切变形。愈接近外层，剪切角愈大，即 $\gamma_5 > \gamma_6$，这是由于外层金属受到摩擦阻力的影响较大，使得内外层的金属流动存在着较大差异的缘故。刚开始挤出端部剪切角较小，以后逐渐增大，即 $\gamma_5 > \gamma_6$，这是由于刚开始挤压时，受摩擦影响较小的缘故，当进入稳定变形状态以后，相应处的剪切角保持不变。

4）凹模出口转角 D 处，在挤压过程中形成不流动的“死区”。“死区”的大小受摩擦阻力、凹模形状与尺寸等因素的影响，当摩擦阻力越大、凹模锥角越大时，则“死区”也越大。

从上述分析可以看出，正挤压实心件的变形特点是：金属进入Ⅰ-Ⅰ至Ⅱ-Ⅱ线之间的区域时才发生变形，此区称为剧烈变形区。进入此区以前或离开此区以后，金属几乎不变形，仅作刚性平移。在变形区内，金属的流动是不均匀的，中心层流动快，外层流动慢；而当进入稳定变形阶段以后，不均匀变形的程度是相同的。在凹模出口转角处会产生程度不同的金属“死区”。

1.3　正挤压空心件的金属流动情况

正挤压空心件的坐标网格变化情况见图 8.2-3。毛坯除了受凹模工作表面的接触摩擦影响外，还受到心棒表面接触摩擦的影响，因而毛坯上的横向坐标线向后弯曲，不再有产生超前流动的中心区域，这说明正挤压空心件的金属流动比正挤压实心件均匀一些。在进入稳定流动时，剧烈变形区也是集中在凹模锥孔附近高度很小的范围内，金属在进入变形区以前或离开变形区以后，几乎不发生塑性变形，仅作刚性平移。

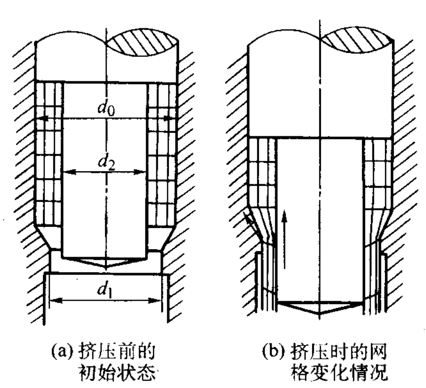


图 8.2-3　正挤压空心件的金属流动情况



2　影响型材挤压变形的主要因素分析

2.1　接触摩擦与润滑

挤压时金属与模具间存在接触摩擦力，其中以挤压筒壁上的摩擦阻力对金属流动的影响最大。当摩擦力很小时，变形区范围小且集中模孔附近，金属流动比较均匀；当摩擦力很大时，变形区压缩锥和死区的高度增大，金属流动则很不均匀，以致促使锭坯外层金属过早地向中心流动形成较长的缩尾；但是，在某些情况下，可以有效地利用金属与工具之间接触摩擦作用来改善金属的流动，如在挤压管材时，由于锭坯中心部分的金属受到穿孔针摩擦作用和冷却作用，而使其流速减缓，从而使金属流动变得较为均匀，减短产生缩尾的长度；在挤压断面壁厚变化急剧的复杂异形型材时，在设计模孔时利用不同的工作带长度对金属产生不同的摩擦作用来调节型材断面上各部分的流速，从而减少型材的扭拧、弯曲度、提高产品的精度。

在润滑挤压筒表面和穿孔针的条件下，用空心锭挤压管材和空心型材时，其金属流动类似于润滑挤压实心型材时的金属流动，即变形集中于模孔附近（图 8.2-4a）。在不润滑挤压筒表面的条件下，表面层产生强烈的剪切变形，而且塑性变形扩展到锭坯的整个体积内（图 8.2-4b），这类似于不润滑挤压实心型材时的情况。用穿孔针挤压时，由于穿孔针占据了锭坯的中心部分和穿孔针表面上的摩擦力的作用，减少了金属中心层的超前运动，因而减少了变形的不均匀性，而且可避免中心缩尾的形成。

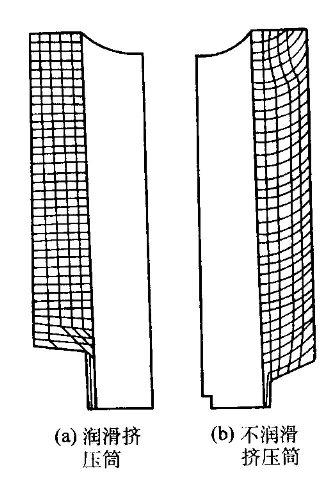


图 8.2-4　挤压管材时锭坯中的金属流动景像图

2.2　凹模角度及形状

挤压铝合金时，最常采用的凹模主要有平面模和锥形模。模角 α 越大，则金属流动越不均匀，用平面模挤压时，出现变形不均匀性的最大值。同时，随着模角的增大，死区的高度也逐渐增加。模角对金属流动的影响示于图 8.2-5 中，由图可见，锥模较平模的流动均匀。但是，当 $\alpha \leqslant 60°$ 时，易于把铸锭表面的脏物、缺陷带入制品而影响产品的表面质量。为了保证产品质量，同时兼顾金属流动均匀和挤压力不过分增大，在挤压管材和中间毛料时，通常取锥形模的 α 为 60°～65°，而对于表面质量要求特别高的棒材和型材来说，一般采用平面模（$\alpha = 90°$）来进行挤压。

此外，在挤压管材和空心型材时，穿孔针的结构和形状及锥度，舌型模和平面分流组合模的结构、分流孔的大小和形状、焊合室的形状和尺寸、宽展模的宽展角、变断面模子中过渡区的结构和形状等都对金属的流动有很大的影响。在设计模子时应特别注意选择合理的结构和形状，以获得较均匀的金属流动。

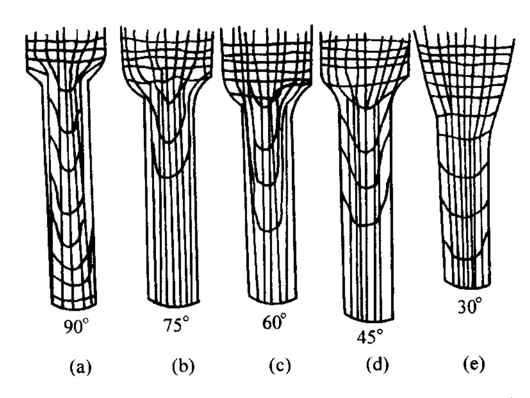


图 8.2-5　不同模角对金属流的影响

为了增大铸锭和产品的几何相似性，改善金属流动的均匀性，减少挤压力，一般采用扁挤压筒来挤压宽厚比大的扁宽薄壁型材和整体带筋壁板。图 8.2-6 示出了用扁挤压筒挤压 2A12 合金带筋壁板时铸锭大面坐标网格的变化图。由图可见，金属的流动要比圆挤压筒挤压时均匀得多，铸锭中心部分的网格横向线基本上未发生弯曲，仅外层金属由于受挤压筒壁摩擦阻力的影响而发生了横向弯曲，而在挤压末期，铸锭中心部分的金属流速减慢，使网格线呈 W 形，从而减少缩尾的形成。

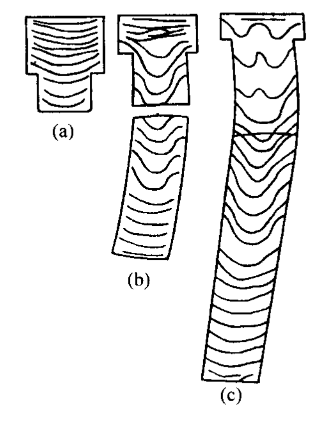


图 8.2-6　用扁挤压筒挤压 2A12 壁板时铸锭大面坐标网格变化图

（a）残料长 444 mm 时壁板长 285 mm

（b）残料长 240 mm 时壁板长 1 550 mm

（c）残料长 97 mm 时壁板长 2 600 mm

挤压垫片的结构和形状对金属的流动也有一定的影响。采用凹形垫片可以稍许增加金属的流动性，但因挤压残料增大，加之也较麻烦，故除了连续挤压之外，一般用平垫片进行挤压。

2.3　模孔的排列

模孔的排列有两个方面的影响：一是距离挤压筒中心的远近，接近中心的部分，金属流动快，而远离中心的部分由于受到挤压筒壁摩擦阻力的影响而使金属流速减慢；二是塑性变形区内供给各模孔或模孔各部分的金属量的分配，供应充足的部分流速较快，反之，供应不足的部分则金属流速减慢。因此，为了增加金属流动的均匀性，模孔应尽量对称地布置在模子平面上，在设计多孔模时，各模孔的中心应布置在距离中心某一合适距离的同心圆上。在设计异形型材时，应使易流出的厚壁部分远离中心，而把难于流动的薄壁部分

靠近中心。模孔在模子平面上的合理布置，可大大改善各部分金属的流动均匀性，从而减少产品的弯曲、扭拧和各产品的流速差以及每根产品因流速不同而产生的表面擦伤。

2.4 表面状态

工模具的表面粗糙度、圆滑度、表面硬度和表面的润滑状态也是影响金属流动均匀性的重要因素之一。表面越光洁、过渡越圆滑、表面硬度越高、润滑条件越好，则挤压时的金属流动越均匀。因此，在设计和制造工模具时应尽量获得良好表面状态以改善金属流动均匀性。

2.5 加热温度

在挤压时，锭坯横断面上的温度越均匀，则挤压时的流动也越均匀。因此，应尽量减少挤压筒、挤压垫片和穿孔针、模具与变形金属之间的温度差。在挤压过程中，挤压筒加热保温、工模具预热等措施是十分重要的。

2.6 合金性能

金属及合金的强度与塑性对流动景像也有很大的影响。一般来说，强度越高，黏性越小；挤压温度越低则金属流动性越均匀。此外，铸锭长度、变形程度、挤压速度等对金属的流动均匀性也有一定的影响，如铸锭前端长度约为 1～1.5$D_{\text{筒}}$ 的部分，金属流动极不均匀；变形程度过大或过小时，金属流动都不均匀；金属的流速过快，会增大金属流动的不均匀性能。

3 型材挤压力的计算

根据上述型材挤压变形规律及其主要影响因素的分析和挤压力—行程曲线，一般铝合金的挤压力可采用如下公式进行计算

$$P = R_{\text{锥}} + T_{\text{锥}} + T_{\text{筒}} + T_{\text{定}}$$

式中，$R_{\text{锥}}$ 为克服内摩擦所需的力，即基本变形力；$T_{\text{锥}}$ 为克服变形区压缩锥侧表面上摩擦所需的力；$T_{\text{筒}}$ 为克服挤压筒和穿孔针侧表面摩擦所需的力；$T_{\text{定}}$ 为克服工作带表面上摩擦所需的力。

下面分别介绍计算该公式中各个子项的别尔林公式、古布金公式和计算总的挤压力的经验公式。

3.1 别尔林公式

该公式是根据主应力法推导出来的。在各种挤压条件下的别尔林公式如下：

1）实心圆锭单孔模挤压

$$R_{\text{锥}} = \frac{0.785(i + i_{\text{附}})}{\cos^2 \alpha/2} D_{\text{H}}^2 2K_{\text{锥}}$$

$$T_{\text{锥}} = (0.785/\sin\alpha) iD_{\text{H}}^2 f_{\text{k锥}} K_{\text{锥}}$$

$$T_{\text{定}} = \mu F_{\text{定}} f_{\text{k定}} K_{\text{锥k}}$$

$$T_{\text{筒}} = \pi D_{\text{H}}(L_{\text{H}} - h_{\text{死}}) f_{\text{k筒}} K_{\text{筒}}$$

2）实心圆锭多孔模挤压

$$R_{\text{锥}} = \frac{0.785(i + i_{\text{附}})}{\cos^2 \alpha/2} D_{\text{H}}^2 2K_{\text{锥}}$$

$$T_{\text{锥}} = (0.785/\sin\alpha) iD_{\text{H}}^2 f_{\text{k锥}} K_{\text{锥}}$$

$$T_{\text{定}} = \mu \sum F_{\text{定}} K_{\text{锥k}}$$

$$T_{\text{筒}} = \pi D(L_{\text{H}} - h_{\text{死}}) f_{\text{k筒}} K_{\text{筒}}$$

3）实心扁锭单孔模挤压

$$R_{\text{锥}} = \frac{1.15 F_{\text{H}} ia}{\sin\alpha} 2K_{\text{锥}}$$

$$T_{\text{锥}} = \frac{F_{\text{H}}}{\sin\alpha} ifk_{\text{锥}} K_{\text{锥}}$$

$$T_{\text{定}} = \mu F f_{\text{定}} fk_{\text{定}} K_{\text{锥k}}$$

$$T_{\text{筒}} = (L_{\text{H}} - h_{\text{死}}) S_{\text{H}} f_{\text{k筒}} K_{\text{筒}}$$

4）空心圆锭柱式固定针挤压

$$R_{\text{锥}} = 0.86\left(\frac{D_{\text{H}}^2}{\cos^2 \alpha/2} - \frac{d_{\text{k}}^2}{\cos^2 \varphi/2}\right) i2K_{\text{锥}}$$

$$T_{\text{锥}} = \frac{\pi}{4\sin\alpha}(D_{\text{H}}^2 - d_{\text{k}}^2)\left[(f_{\text{s1}} + f_{\text{s2}}) + 2f_{\text{s2}} \ln \frac{D_{\text{k}} - d_{\text{k}}}{D_{\text{H}} - d_{\text{k}}}\right] K_{\text{锥}}$$

$$T_{\text{定}} = \pi(D_{\text{k}} f_{\text{s定}} + d_{\text{k}} f_{\text{s针}}) \mu h_{\text{定}} K_{\text{锥k}}$$

$$T_{\text{筒}} = \pi\left[L_{\text{H}} - \left(0.6 + \frac{0.27}{\sqrt{\mu}}\right)(D_{\text{H}} K_{\text{筒}} + d_{\text{k}} K_{\text{筒}} f_{\text{L针}})\right]$$

5）空心圆锭柱式活动针挤压

$R_{\text{锥}}$、$T_{\text{锥}}$、$T_{\text{定}}$ 三项分力与空心圆锭柱式固定针挤压相同，$T_{\text{筒}}$ 可按下式计算：

$$T_{\text{筒}} = \pi D_{\text{H}}\left[L_{\text{H}} - \left(0.6 + \frac{0.27}{\sqrt{\mu}}\right)(D_{\text{H}} - d_{\text{k}})\right] K_{\text{筒}}$$

6）舌型模挤压（需加上 $T_{\text{脊}}$）

$$R_{\text{锥}} = 1.15 D_{\text{H}}^2 (i + i_{\text{附}}) 2K_{\text{锥}}$$

$$T_{\text{锥}} = 0.45 D_{\text{H}}^2 i2K_{\text{锥}}$$

$$T_{\text{脊}} = 0.4(D_{\text{H}}^2/\sin\beta) 2K_{\text{锥}} \ln\left(\frac{0.8D_{\text{H}}^2}{0.8D_{\text{H}} d_{\text{k}}}\right),（\beta \text{ 为分流入口角}）$$

$$T_{\text{筒}} = 1.6 D_{\text{H}}(L_{\text{H}} - 0.6D_{\text{H}} - 0.3D_{\text{k}}) K_{\text{筒}} f_{\text{k筒}}$$

$$T_{\text{定}} = F_{\text{定}} h_{\text{定}} \mu (S_{\text{外}} + S_{\text{内}}) K_{\text{锥k}}$$

用图 8.2-7 所示的计算图，舌型模挤压时也可建立如下一套计算公式：

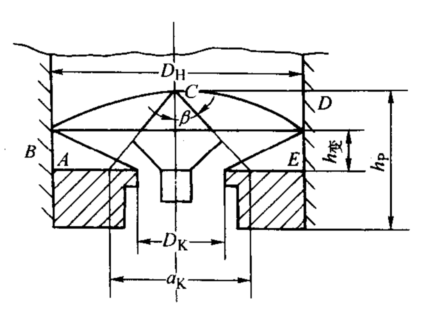


图 8.2-7 舌型模挤压管材的变形区图

$$R_{\text{锥}} = 1.1\left(\frac{\pi D_{\text{H}}^2}{4\cos^2 \alpha/2}\right) i2K_{\text{锥}}$$

$$T_{\text{锥}} = \frac{\pi D_{\text{H}}^2}{4\sin\alpha} \ln\left(\frac{D_{\text{H}} - d_{\text{k}}}{D_{\text{k}} - d_{\text{k}}}\right) 2K_{\text{锥}}$$

$$T_{\text{脊}} = \frac{\pi D_{\text{H}}^2}{4\sin\beta} \ln\left(\frac{\pi D_{\text{H}}}{\pi D_{\text{H}} - 4a_{\text{k}}}\right) 2K_{\text{锥}}$$

$$T_{\text{筒}} = \pi D_{\text{H}}[L_{\text{H}} - h_{\text{弹}} - (0.2 \sim 0.3) D_{\text{H}}] K_{\text{筒}}$$

$$T_{\text{定}} = \mu \pi L_{\text{H}} (D_{\text{k}} + d_{\text{k}}) f_{\text{k定}} K_{\text{锥k}}$$

7）平面组合模挤压

$$P = P_1 + P_2 = (R_{\text{锥}} + T_{\text{锥}} + T_{\text{筒}} + T_{\text{定}}) + (R'_{\text{锥}} + T'_{\text{锥}} + T'_{\text{定}})$$

$$R_{\text{锥}} = 3.5 F_{\text{H}} iK_{\text{锥}}$$

$$T_{\text{筒}} = 4.7 D_{\text{H}}(L_{\text{H}} - 0.9D_{\text{H}}) f_{\text{k筒}} K_{\text{筒}}$$

$$T_{\text{定}} = 0.5\mu \sum F_{\text{定}} f_{\text{k定}} K_{\text{锥k}}$$

$$T_{\text{锥}} = 1.15 F_{\text{H}} iK_{\text{锥}}$$

$$R'_{\text{锥}} = 3F_{\text{焊}} K_{\text{锥}}\left(\ln \frac{F_{\text{焊}}}{F_{\text{制}}} + \ln \frac{S_{\text{制}}}{S_{\text{焊}}}\right)$$

$$T'_{\text{锥}} = f_{\text{锥}} K_{\text{锥}} \frac{\pi}{2\sin\alpha}(D_{\text{锥}}^2 - d_{\text{k}}^2) \frac{D_{\text{锥}} - D_{\text{k}}}{D_{\text{k}} - d_{\text{k}}}$$

$$T'_{\text{定}} = 0.5\mu (S_{\text{内}} + S_{\text{外}}) L_{\text{定}} K_{\text{锥k}} f_{\text{k定}}$$

8）变断面管材挤压

$$P = \sigma_{\text{s}}\left\{4.8F_{\text{H}} \lg\lambda + \frac{\pi}{2}\left[L_{\text{H}} \frac{d_{\text{k}}}{4} + D_{\text{H}}\left(L_{\text{H}} - 1.5\frac{D_{\text{H}}}{2} + \frac{d_{\text{k}}}{2} - 1\right)\right]\right\}$$



9）变断面型材挤压

$$P = P_1 + \mu P_2$$

$P_1 = R_{锥} + T_{锥} + T_{筒} + T_{定}$，计算方法与单孔实心型材相同。

$$P_2 = 1.9 F_{大头} \ln \frac{F_{大头}}{F_{小头}} f_{大锥} 2K_{锥} +$$

$$0.1 \frac{F_{大头}}{F_{小头}} f_{小锥} 2K_{锥} S_{型} L_{型定}$$

3.2　古布金公式

古布金公式也是基于平均主应力理论推算出来的，适用于一般的挤压过程，其基本形式如下：

$$P = ZF\sigma_{抗} \ln\lambda\left(l + \mu\tan\alpha + \mu\cot\alpha + \frac{4\mu l}{D_H \ln\lambda}\right)$$

式中，Z 为变形不均匀系数，热挤压铝合金时，推荐 $Z = 1.5 \sim 2.0$，复杂产品取上限；F、D_H、l 为挤压筒面积，铸锭直径与长度；λ 为挤压系数；α 为模角；$\sigma_{抗}$ 为不同条件下的变形抗力，可从有关图表中选取。

3.3　经验公式

$$p = \alpha K_f\left(\ln\lambda + \frac{4\mu L}{D}\right)$$

$$F = Ap$$

式中，p 为单位挤压力，MPa；F 为最大挤压力，N；A 为挤压筒内孔面积，mm^2；λ 为挤压系数；K_f 为材料在挤压温度下的变形抗力，MPa；μ 为摩擦因数；L 为镦粗后的铸锭长度，mm；α 为表征挤压难易程度的经验系数，对于实心型材取 $\alpha = 1.0 \sim 1.1$；对于空心型材取 $\alpha = 1.1 \sim 1.5$。

4　铝合金型材挤压过程有限元数值模拟

在铝型材的挤压过程中，由于型材截面形状复杂，变形集中在局部狭长区域，模具的受力复杂，导致模具的使用寿命低。另一方面，型材截面的特殊性，使得变形过程中金属脱离工作带后经常发生翘曲，严重影响着产品的平整性。因而，如何提高铝型材的质量和挤压模具的使用寿命，如何合理设计挤压模工作带的形状尺寸，是各大铝型材生产厂家的重要课题。以有限元方法为代表的数值模拟在塑性成形中得到了较为广泛的应用。它可以形象地描述金属在模具型腔内的流动行为，提供变形体及模具在成形过程中各种物理学场量的分布及变化规律，从而为模具设计提供依据。

4.1　塑性成形有限元基本理论

（1）刚塑性、刚粘塑性有限元基本方程

刚塑性、刚粘塑性材料在塑性成形过程中应满足下列基本方程：

1）平衡方程。
2）几何方程。
3）本构方程。
4）屈服准则。
5）体积不可压缩条件。
6）力和速度边界条件。

设变形体的体积为 V，表面积为 S，在 S_f 面上给定面力 F_i，在 S_v 面上给定速度 U_i，将变形体用四面体四节点单元进行离散，采用罚函数法，可得泛函

$$\pi = \int_v \bar{\sigma}\dot{\bar{\varepsilon}} dV + \frac{\alpha}{2}\int_v \dot{\varepsilon}_v^2 dV - \int_{S_f} F_i U_i dS \qquad (8.2\text{-}1)$$

根据 Markov 变分原理，当 $\delta_\pi = 0$ 时可得真实解。对上式进行变分及线性化处理，得到关于速度增量 ΔU 的有限元求解方程

$$[S]_{n-1} \cdot [\Delta U]_{n-1} = [R]_{n-1} \qquad (8.2\text{-}2)$$

式（8.2-2）常用 Newton-Raphson 迭代法进行求解。

（2）热传导基本方程

对非等温塑性成形问题，还必须考虑温度的变化。设 k 为材料的导热系数，ρ 为材料密度，c 为材料比热容，q_n 为法向热通量，α 为机械能向热能的转化率（通常取 $\alpha = 0.9$），则考虑塑性变形热和摩擦生热的能量守恒方程可表示为

$$\int_v kT_i \delta T_i dV + \int_v \rho c \dot{T} \delta T dV - \int_v \alpha \bar{\sigma} \dot{\bar{\varepsilon}} \delta T dV - \int_s q_n \delta T ds = 0 \qquad (8.2\text{-}3)$$

用有限元网格将变形体离散化，并采用差分法对时间域进行离散，则式（8.2-3）可写成如下的差分方程：

$$(\boldsymbol{C}/\Delta t + \beta \boldsymbol{K})\boldsymbol{T}_n + [-\boldsymbol{C}/\Delta t + (1-\beta)\boldsymbol{K}]\boldsymbol{T}_{n-1} = \overline{\boldsymbol{Q}} \qquad (8.2\text{-}4)$$

式中　$\overline{\boldsymbol{Q}} = \beta \boldsymbol{Q}_n + (1-\beta)\boldsymbol{Q}_{n-1}$，$\beta$ 为差分因子（$\beta = 0 \sim 1$）。

4.2　三维有限元模拟中关键技术的处理

（1）模具型腔的几何描述及动态边界处理

三维有限元模拟首先遇到的问题便是模具边界几何信息的描述。本研究的有限元模拟器中，采用统一的 Bezier 曲面来描述模具型腔边界，模具表面上任意一点的位置矢量，可由下式求得

$$\boldsymbol{P}(uv) = \sum_{j=0}^{m}\sum_{k=0}^{m} \boldsymbol{P}_{jk} \cdot B_k^n(u) \cdot B_k^n(v) \qquad (8.2\text{-}5)$$

式中，u，v 为曲面参数坐标；m，n 为沿 u，v 方向上曲线的阶数；$\boldsymbol{P}_{jk}$ 为控制顶点的位置矢量；B_k，B_j 为控制顶点的基底函数。

有限元模拟中动态边界的处理是模拟系统的关键，它直接影响着模拟的失真与否。这种动态边界的处理分为变形体自由节点同模具接触和接触节点脱离模具两个方面。变形体边界自由节点的触模可根据它与模具的相对运动及他们的相对位置来判别，这种关系可用下式来进行描述

$$\begin{cases} \Delta t_i = (\boldsymbol{P}_d - \boldsymbol{P}_i) / (\boldsymbol{U}_d - \boldsymbol{U}_i) \\ 0 < \Delta t_i < \Delta t \end{cases} \qquad (8.2\text{-}6)$$

式中，Δt_i 为边界节点到达模具表面的最小时间；Δt 为当前加载步的时间步长；$\boldsymbol{P}_i$，$\boldsymbol{U}_i$ 为节点 i 的位置和速度矢量；$\boldsymbol{P}_d$ 为节点 i 向模具表面法线方向投影点的位置矢量；$\boldsymbol{U}_d$ 为模具的运动速度。

若 Δt_i 满足式（8.2-6），则节点 i 在该加载步上同模具接触，对其施加边界约束条件。

触模边界节点的脱模判断，可根据每加载步上节点沿模具表面法线方向的应力（或力）状态来确定。若它满足

$$\sigma_{in} \geqslant 0 \text{ 或 } F_{in} \geqslant 0 \qquad (8.2\text{-}7)$$

则表明节点 i 与模具表面间的相互作用力为拉应力，或者为拉力；此时，该节点 i 应当脱离模具。

（2）变形体的离散化及其网格再划分

三维有限元分析遇到的最大困难莫过于对分析对象的离散化。目前，任意空间几何形体的六面体单元网格自动生成还很难完全得以实现。本文采用四面体单元对变形体进行离散以及对畸变后的变形体网格进行重构，并采用式（8.2-8）进行新旧网格系统间物理信息的传递，同时根据新、旧边界节点在空间的位置关系，实现边界条件的自动转换。



$$F_i(\zeta,\eta,\zeta) = \sum_{j=1}^{m} N_j(\zeta,\eta,\zeta) F_j \qquad (8.2\text{-}8)$$

式中，m 为单元节点数；F_i 为新网格系统的场量；F_j 为旧网格系统的场量；N_j 为旧网格系统的形函数。

（3）极限应变速率的选取

金属塑性成形过程往往是弹性区与塑性区并存，有限元模拟中常用极限应变速度 $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ 来进行区分。对于刚-黏塑性材料，在每一加载步上，对 $\dot{\bar{\varepsilon}} \leqslant \dot{\bar{\varepsilon}}_0$ 的区域认为是弹性区（即刚性区），对 $\dot{\bar{\varepsilon}} > \dot{\bar{\varepsilon}}_0$ 的区域则视为塑性区。

有限元模拟中，$\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ 过大将影响模拟结果的精度，而 $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ 过小相当于约束条件太少，收敛性变差甚至不收敛（特别是挤压成形问题）。所以，极限应变速率的选取非常重要。本研究选取 $\dot{\bar{\varepsilon}}_0 = (0.010\,0 \sim 0.000\,1)\dot{\bar{\varepsilon}}_v$，其中 $\dot{\bar{\varepsilon}}_v$ 为当前加载步的平均应变速率。

4.3　铝合金型材非等温挤压过程模拟实例

（1）角铝型材挤压过程三维有限元模拟

图 8.2-8 所示为某厂生产的角铝型材产品截面图。

材料为铝合金 6062，挤压筒直径为 100 mm，模具与工件间的摩擦因子为 0.25，挤压比为 48.7，流动应力 – 应变关系为

$$\bar{\sigma} = 209(\bar{\varepsilon})^{0.122}$$

式中，$\bar{\sigma}$ 单位为 $N \cdot mm^{-2}$。

由于角铝型材为对称零件，取其二分之一模型进行分析，并对初始坯料进行了非均匀性离散，离散后的网格如图 8.2-9a 所示。该模型采用了八节点六面体单元，共有 4 431 个节点，4 144 个单元。

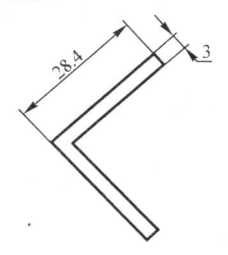


图 8.2-8　角铝型材产品截面图

图 8.2-9 所示为挤压坯料的初始及变形过程中网格的畸变情况。由图 8.2-9 可以看出，塑性变形首先由模口下部区域开始发生，逐渐发展到附近的局部区域，其他区域的网格几乎没有发生畸变，说明挤压塑性变形区主要集中在模口下附近的局部区域。从模口挤出的挤压件高度各处不相等，靠近挤压筒中心区域挤出的高度较高，远离挤压中心筒区域挤出的高度较低，表明挤压时变形不均匀。图 8.2-10 所示为挤压变形后的流速分布。由图 8.2-10 可以发现，在挤压坯料中存在一个以模口纵轴为中心的涡流场，这是造成异型型材挤压时出现扭拧、波浪和弯曲等缺陷的重要原因。图 8.2-11 和图 8.2-12 所示分别为挤压变形后的等效应变分布情况。由图可以得出，模口周围区域的等效应力和等效应变都为最大，表明模口周围区域金属变形最为激烈，因而模具模口部分最先磨损。

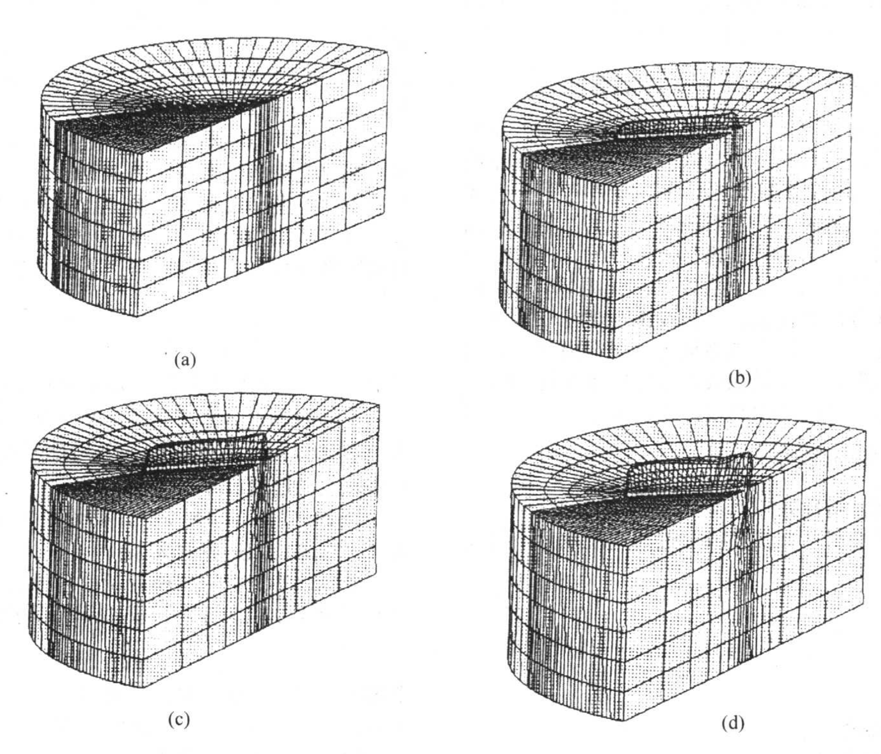


图 8.2-9　不同变形阶段时的网格畸变情况

（2）复杂铝型材非等温挤压过程模拟实例

铝型材一般以其截面图表示，图 8.2-13 所示为一典型的铝型材产品截面图。对于这类截面形状相当复杂的铝型材产品，挤压加工往往需要先进行预成形，然后再加工成所需要的形状。这里选取如下的工艺条件对图 8.2-13 所示的铝型材挤压成形过程进行模拟：



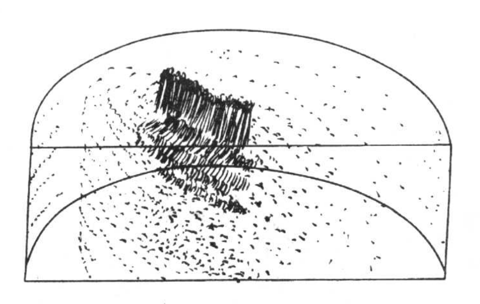
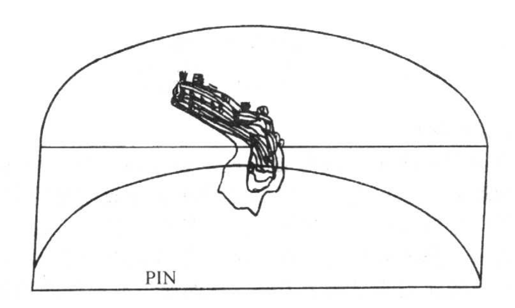


图 8.2-10　增量步为 170 时的流速分布



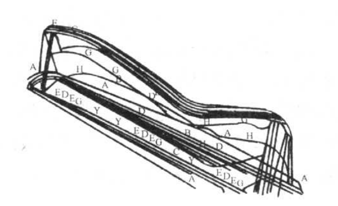


图 8.2-11　增量步为 170 时的等效应变分布



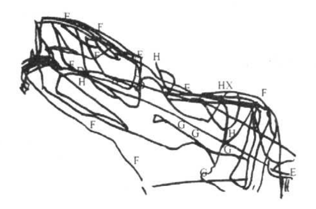


图 8.2-12　增量步为 170 时的等效应力分布

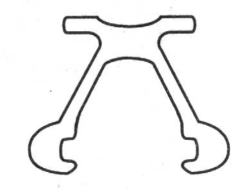


图 8.2-13　铝型材产品截面图

挤压设备：1 250 t 水压机；
挤压筒直径：325 mm；
材料：LC4；
铸锭规格：320 mm × 100 mm；
铸锭加热温度：420 ~ 440℃；
挤压筒加热温度：350℃；
挤压速度：20 mm/s；
润滑条件：石墨 + 润滑油。

由于模具的型腔表面比挤压头复杂，为了节省计算时间，这里对初始坯料进行非均匀性离散，离散后的网格如图 8.2-14 所示。该网格包含 3 800 个四面体单元和 996 个节点。整个挤压过程可分为预成形、非稳定挤压成形和稳定挤压成形 3 个阶段，经历了 8 次网格再划分，得到的模具载荷—时间曲线如图 8.2-15 所示。

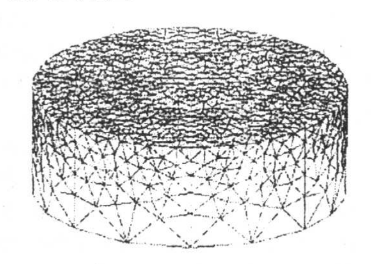


图 8.2-14　初始网格

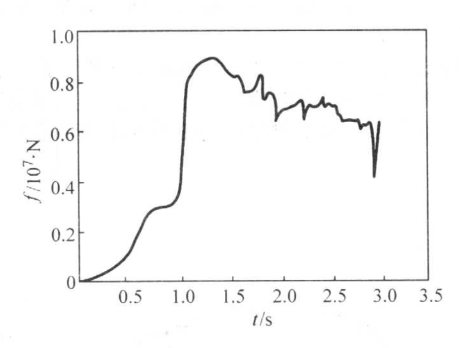


图 8.2-15　载荷 – 时间曲线

预成形时，坯料金属在挤压头的推动下，一方面向四周扩散，充填挤压筒；另一方面沿着预成形模具表面向下流动。当金属充满预成形模腔时，即完成了金属的预选分配。第一阶段结束，成形时间为 0.983 s。该阶段中由于金属大量流入预成形模腔，死区相对较少，因而成形比较容易，挤压头承受的载荷较低，如图 8.2-15 所示。图 8.2-16 为挤压变形后的网格，图 8.2-17a 所示为预成形结束时变形体的等效应变分布。它表明，在第一阶段的成形过程中，变形主要集中在坯料顶端与预成形模接触的边沿区域。

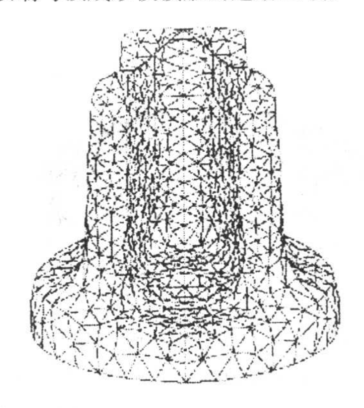
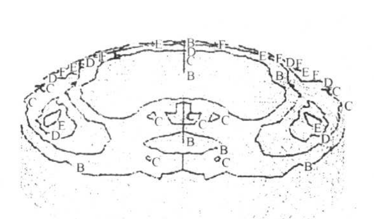
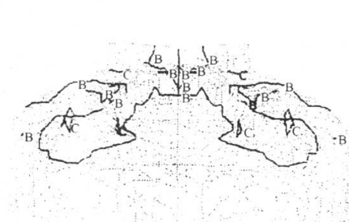


图 8.2-16　变形网格

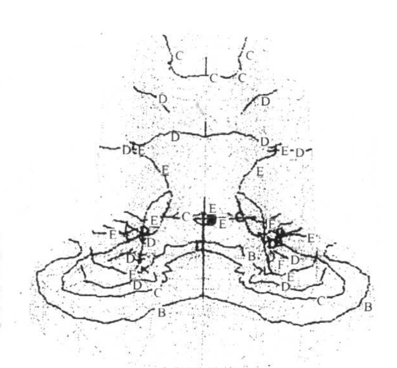




(a) A:0.001 0; B:0.229 7; C:0.448 3; D:0.666 9; E:0.885 0; F:1.104 1



(b) A:0.073 8; B:0.909 6; C:1.745 3; D:2.581 1; E:3.416 9; F:4.252 6



(c) A:0.430 3; B:0.979 5; C:1.528 7; D:2.077 9; E:2.627 1; F:3.176 3

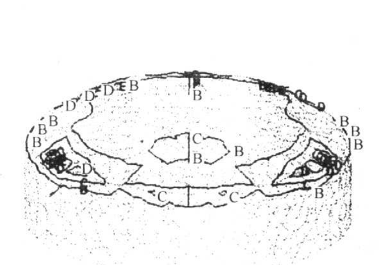
图 8.2-17 成形过程中的等效应变分布

经过预成形的半成品金属进入终成形平面模后，由于平面模模口形状狭长而又复杂，金属的流动变得十分困难，死区金属相对增多，这就使得成形载荷急剧上升。直到前沿金属流出工作带，成形载荷达到极限，第二阶段结束。此时总的成形时间为 1.797 s。图 8.2-15 所示的曲线表明，极限成形载荷为 8.86×10^6 N，因此，选用 1 250 t 的水压机进行成形。图 8.2-17b 所示为第二阶段结束时变形体等效应变的分布情况。由图中可以看出，在第二阶段，变形主要集中在平面模模口附近局部区域，变形相当剧烈，最大等效应变达到 4.252 6。

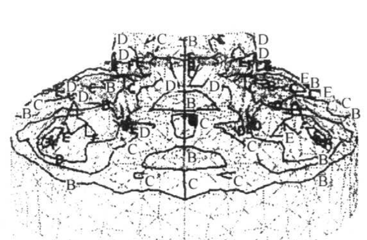
挤压成形过程中，一旦金属流出工作带，挤压就进入稳定成形阶段。在该阶段的成形过程中，由于大量金属已流出工作带，他们强大的牵附作用使成形变得相对容易得多，成形载荷也明显减小，载荷曲线也变得比较平缓。图 8.2-17c 所示为坯料挤出相当长度以后变形体的等效应变分布情况，它说明稳定挤压阶段，变形仍集中在模口附近。由图 8.2-16 可以看出，挤压成形过程中，由于模具表面摩擦力的作用，心部金属的流动明显快于表层，从而使得成形件的顶端呈锥形；另一方面，由于模口截面各部分不均匀，金属流经工作带时各部分速度也有快有慢，这就使得工件顶端崎岖不平。

如图 8.2-18a，b，c 所示分别为 3 个不同挤压成形阶段变形体内温度场的分布情况。由于模具预热温度与坯料初始成形温度接近，成形体与模具有热交换相对较少，成形过程中变形体的温度升高则主要来自于塑性变形生热和摩擦生热，因而变形体温度场的分布与其等效应变的分布一致。

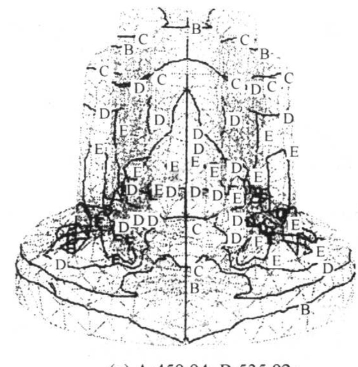
如图 8.2-19a，b，c 所示分别为 3 个不同挤压成形阶段变



(a) A:450.81; B:4.88.78: C:526.78; D:564.72; E:602.68; F:640.65

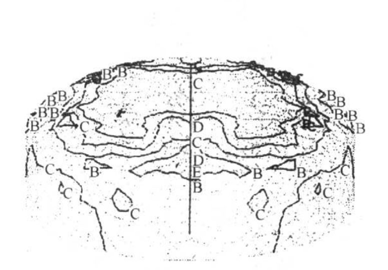


(b) A:452.25; B:494.98; C:537.72; D:580.45; E:623.18; F:665.91

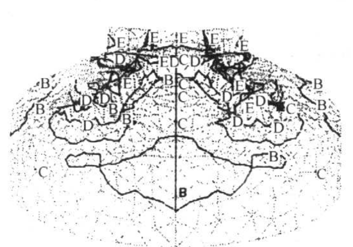


(c) A:459.94; B:535.92; C:611.89; D:687.87; E:763.85; F:839.82

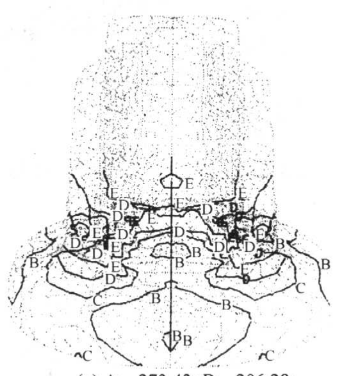
图 8.2-18 成形过程中的温度场分布



(a) A:251.45; B: −195.64; C: −139.83; D: −84.03; E: −28.22; F:27.59



(b) A: −394.00; B: −293.69; C: −193.39; D: −93.09; E:7.21; F:107.52



(c) A: −273.43; B: −206.28; C: −139.14; D: −72.00; E: −4.85; F:62.29

图 8.2-19 成形过程中沿挤压方向应力场分量的分布



形体内沿挤压方向应力场分量的分布情况。预成形阶段，由于挤压头和预成形模腔的双向挤压作用，变形体顶端主要受压应力作用。在以后的终挤压成形过程中，平面模模口附近表层金属由于受模具型腔的约束继续承受压应力，而脱模后的金属则承受拉应力的作用。

4.4 工艺参数对铝型材挤压变形规律的影响

数值模拟技术可以方便地确定金属塑性成形过程各个阶段所需的变形功和载荷，获得工件的内部应力、应变、温度分布和金属流动规律，获得模具的应力、应变、温度分布和合理结构，预测工件的成形形状、残余应力、缺陷、晶粒的粒度和取向分布，是当前研究金属塑性变形规律的主要方法。本文采用有限变形弹塑性有限元方法，对不同挤压参数下铝型材挤压过程进行了数值模拟研究，获得了挤压压力、流速均方差和型材件内部应力应变场随挤压参数的变化规律。

4.4.1 分析方法和有限元模型的建立

在铝型材挤压过程中，金属流速不均衡是导致型材产生弯曲、扭拧、波浪等质量问题的主要原因。因此，为了有效地控制挤压时金属流动的不均匀性，本文引进了一个反映金属流速不均衡性的参数——流速均方差。流速均方差的定义为

$$\mathrm{SDV}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(v_Z^i-v_Z^{\mathrm{ave}})^2}{N}} \tag{8.2-9}$$

式中，N 为所考虑区域（挤压出口端面）的节点数目；v_Z^i 为规定平面上节点轴向速度；v_Z^{ave} 为规定平面上平均轴向速度。

在挤压生产中，通常以挤压比或变形程度来表示金属变形量的大小。挤压比定义为挤压筒截面积与制品截面积之比，即

$$\lambda=S/S_1 \tag{8.2-10}$$

式中，λ 为挤压比；S 为挤压筒截面积；S_1 为制品截面积。

以壁板型材为挤压模拟对象，其型材截面形状和尺寸见图8.2-20和表8.2-1。有限元模拟的初始条件：材料为铝合金6062，其流动应力（$\mathrm{N/mm^2}$）应变关系为

$$\bar{\sigma}=209(\bar{\varepsilon})^{0.122}\ \mathrm{N/mm^2} \tag{8.2-11}$$

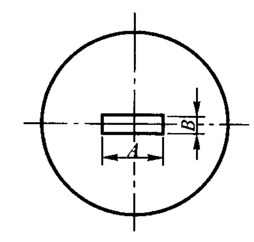


图8.2-20 模拟计算的型材截面形状

表8.2-1 模拟计算的型材截面尺寸和挤压比

序号	A /mm	B /mm	λ
1	48	12.86	6.23
2	40	12	8.02
3	40	8	12.02
4	40	4	24.05

挤压筒直径 70 mm，坯料高度 40 mm，挤压工作带长度 4 mm，模具与工件间的摩擦因子为 0.05～0.85，挤压比为 6.23、8.02、12.02、24.05。

由于壁板型材为对称零件，取四分之一的模型进行计算，以减少计算工作量。对初始坯料进行了非均匀性离散，离散后的网格如图8.2-21所示。

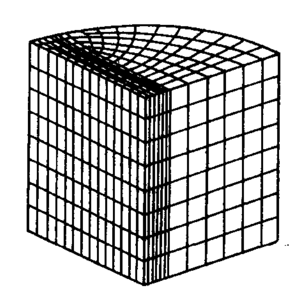


图8.2-21 有限元模型

4.4.2 模拟计算结果分析

（1）挤压比对应力应变分布的影响

1）挤压比对挤压压力的影响。在摩擦因子 $m=0.25$，挤压比分别取8.02、12.02、24.05时，对挤压过程进行了计算，得到了挤压压力在不同挤压比下随行程变化的曲线，如图8.2-22所示。可以看出，在相同条件下，随挤压比增大，变形压力增大，因此挤压压力增大。

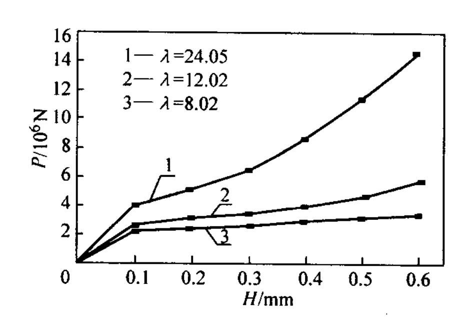


图8.2-22 挤压压力随行程变化曲线

2）挤压比对流速均方差的影响。图8.2-23所示是流速均方差随挤压比的变化曲线。由图中可知，流速均方差随挤压比增加而增大。对于铝合金6063T5，最佳挤压比范围为50～90。当挤压比超过一定程度时，若挤压模结构尺寸设计不够合理时，流速均方差的增大容易造成因流速差异过大而导致挤压件产生弯曲、扭拧、裂纹等缺陷，甚至堵模现象。

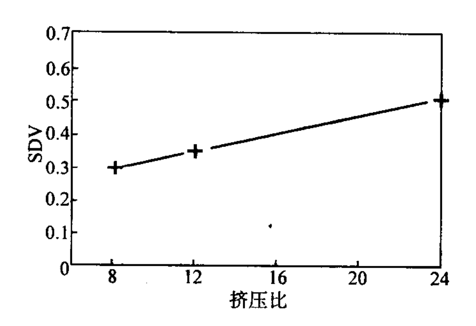


图8.2-23 流速均方差随挤压比的变化曲线

3）挤压比对应力应变分布的影响。图8.2-24和图8.2-25所示分别为挤压比为8.02和24.05时径向应力、周向应力分布情况。从图中可以看出，挤压比较小时，出口端部存在拉应力区，随着挤压比的增加，端部拉应力区逐渐减小并最终消失。

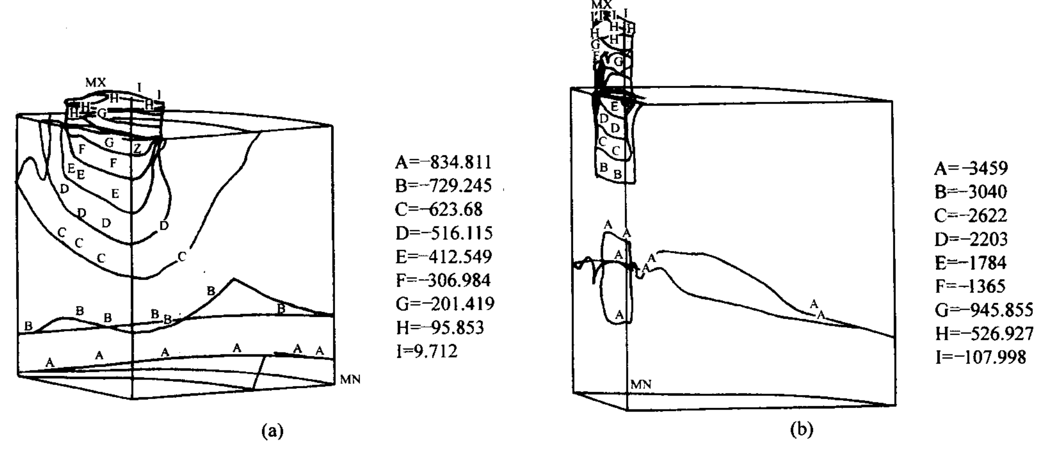


图 8.2-24 不同挤压比时的径向应力分布

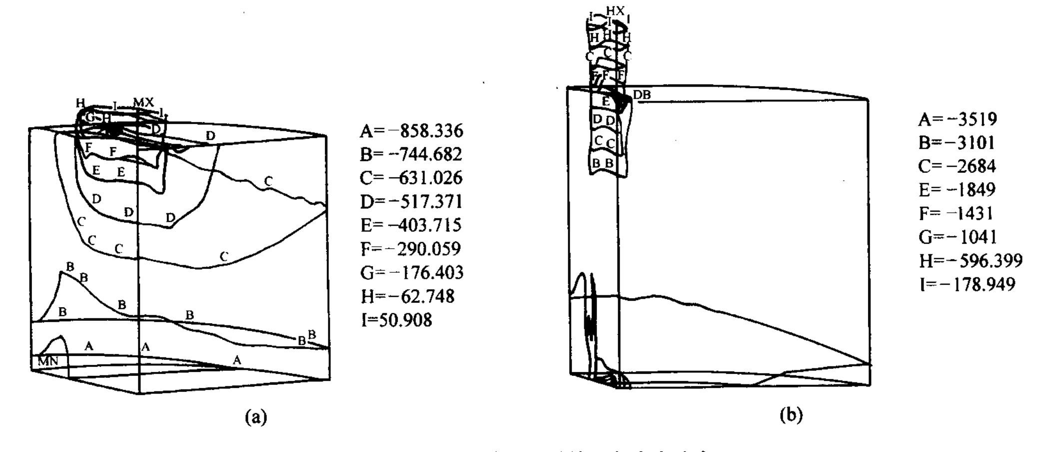


图 8.2-25 不同挤压比时的周向应力分布

图 8.2-26 所示为挤压比分别为 8.02 和 24.05 时的轴向应力分布情况。可以看出，即使在挤压比较小时，轴向应力仍然保持为压应力。

由图 8.2-27 和图 8.2-28 可知，在挤压比较大时，等效应力和等效应变数值愈大，表明变形愈激烈。

（2）摩擦因子对应力应变分布的影响

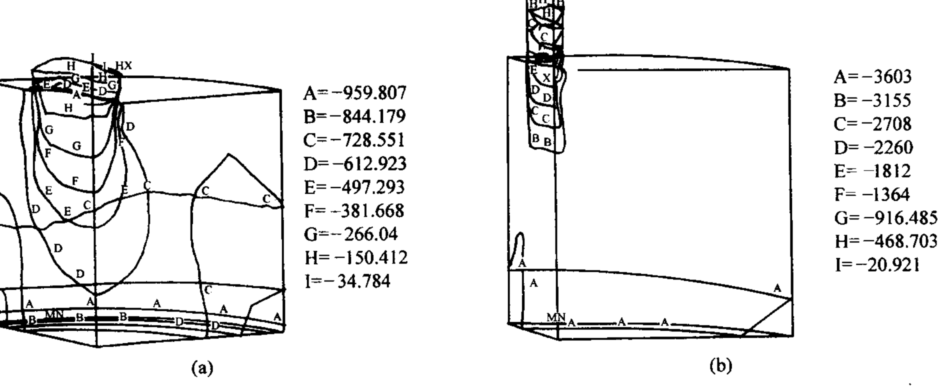


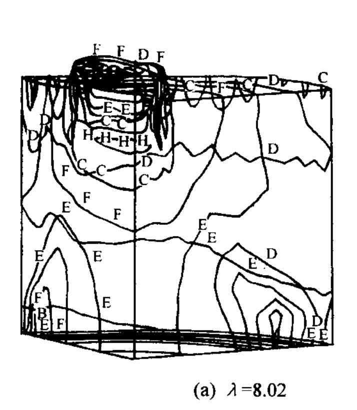
图 8.2-26 不同挤压比时的轴向应力分布

1）摩擦因子对挤压压力的影响。图 8.2-29 所示为挤压比 $\lambda=6.23$ 时，在不同的摩擦因子条件下，挤压压力随变形增量步的变化曲线。可以看出，当摩擦因子从 0.05 增加到 0.85 时，挤压压力增加了 14.4%。说明摩擦因子的变化对挤压压力的影响是较敏感的。

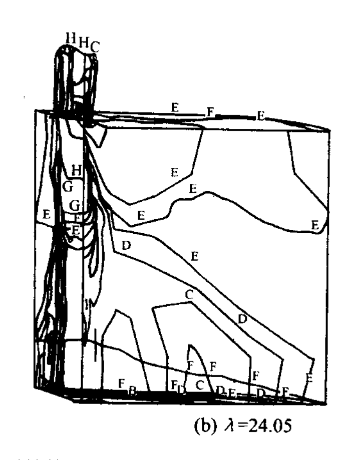
2）摩擦因子对流速均方差的影响。图 8.2-30 所示为挤压比 $\lambda=6.23$ 时，流速均方差随摩擦因子的变化曲线。可以看出，当摩擦因子从 0.05 增加到 0.45 时，流速均方差是递减的；随后摩擦因子从 0.45 增加到 0.85 时，流速均方差稍有增加。因此，实际铝型材挤压生产中应不进行润滑为宜。

3）摩擦因子对应力应变分布的影响。图 8.2-31 和图 8.2-32 所示分别为径向应力和周向应力的分布图。由图可知，坯料在出口端部的径向应力出现拉应力，拉应力值随摩擦因子的增大而增大。摩擦因子对周向应力的影响和对径向应力的影响规律基本相同。

图 8.2-33 所示为挤压比 $\lambda=6.23$，摩擦因子 m 分别为 0.05 和 0.85 时轴向应力的分布情况。由图中可知，坯料在出口端部轴向应力有出现拉应力的趋势，拉应力值随摩擦因

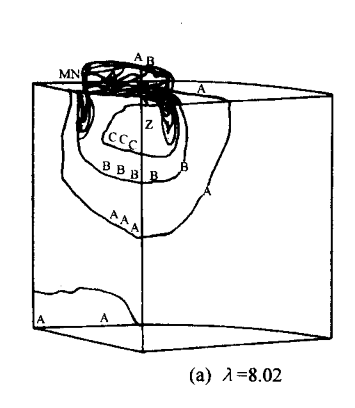


(a) $\lambda=8.02$

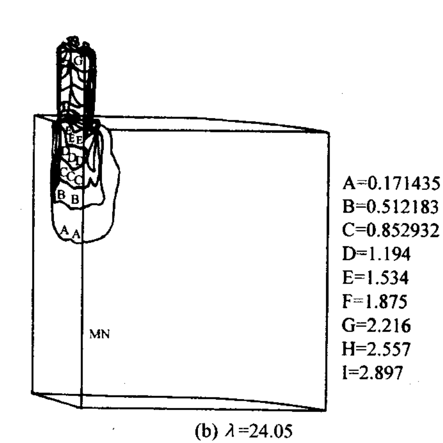


(b) $\lambda=24.05$

图 8.2-27　不同挤压比时的等效应力分布



(a) $\lambda=8.02$



(b) $\lambda=24.05$

图 8.2-28　不同挤压比时的等效应变分布

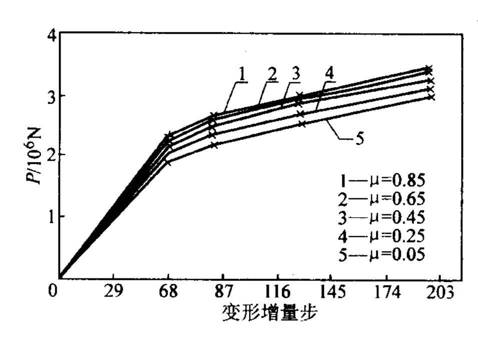


图 8.2-29　挤压压力随变形增量步的变化曲线

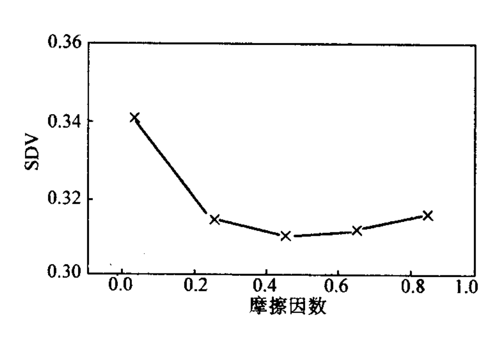
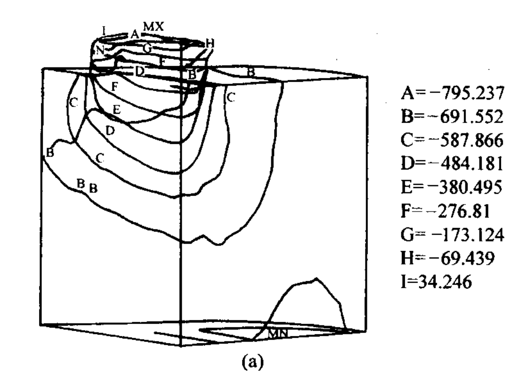
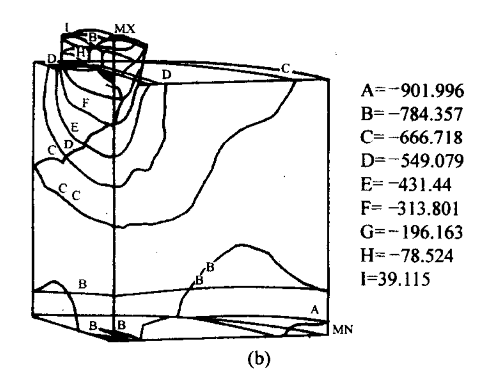


图 8.2-30　流速均方差随摩擦因数的变化曲线



(a)



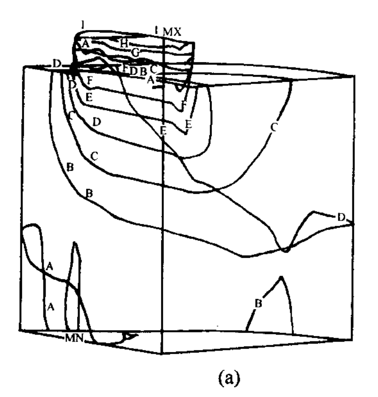
(b)

图 8.2-31　不同摩擦因数时的径向应力分布

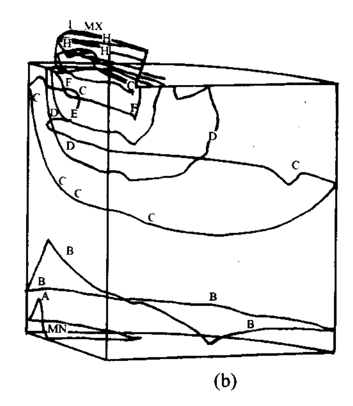
子的增大而减小，同时，随着摩擦因数的增大，型材中存在的压应力值将显著提高。

由图 8.2-34 和图 8.2-35 可知，摩擦因数对等效应力和等效应变分布的影响不显著。



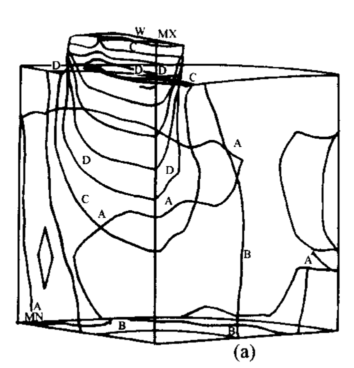


(a)

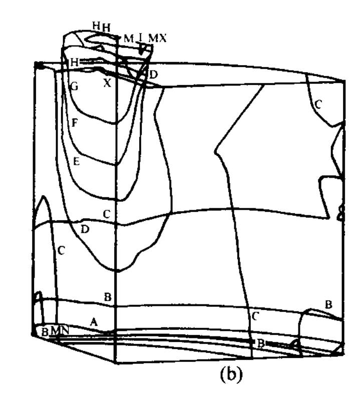


(b)

图 8.2-32　不同摩擦因数时的周向应力分布

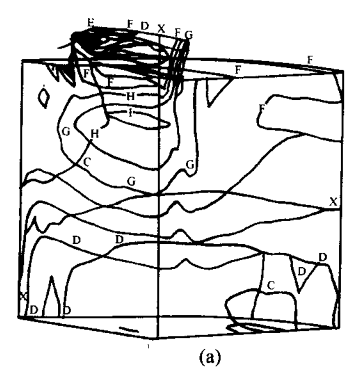


(a)

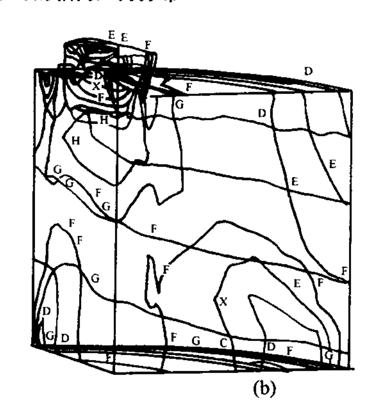


(b)

图 8.2-33　不同摩擦因数时的轴向应力分布

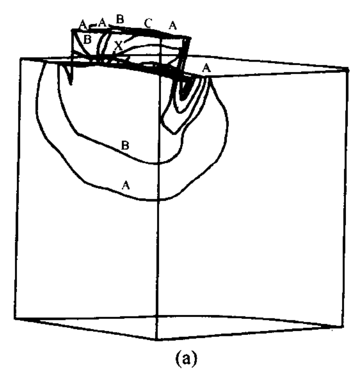


(a)

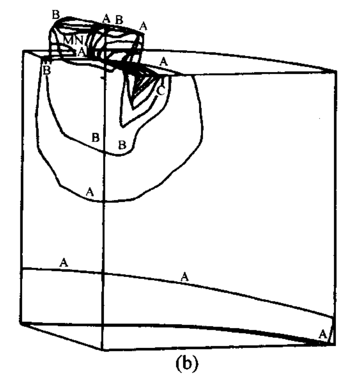


(b)

图 8.2-34　不同摩擦因数时的等效应力分布



(a)



(b)

图 8.2-35　不同摩擦因数时的等效应变分布

5　型材挤压过程工艺参数优化模型

有限元数值仿真不但能够比较精确地描述金属流动过程，而且能够给出各个场量的定量值。因此，它是用来进行工艺参数优化设计和缺陷预测的强有力工具。然而，用有限方法进行成形设计时，为了研究各个工艺参数的影响，也包



含了大量的软试错过程。若要进行优化设计，有限元法的计算量非常大，会造成资源的浪费。正交试验方法[2]是一种基于概率论和数理统计基础上发展起来的一种科学试验方法，具有均衡分散性和整齐可比性。正交试验方法可以用较少的试验反映比较全面的情况，可以考虑多因素、多指标、试验次数少、见效快。人工神经网络是模拟脑神经传递信息的方式而建立起来的一种人工智能方法，为解决非线性系统模拟和未知模型的预测提供了新途径。采用人工神经网络可以解决数值仿真计算量大的缺陷。遗传算法是基于自然选择和遗传机制，在计算机上模拟生物进化机制的科学寻优算法。它不仅适用于连续可导的函数优化问题，还适用于连续不可导的函数优化问题，采用遗传算法可以解决组合参数优化问题。

因此，本文提出一种集数值仿真、人工神经网络和遗传算法为一体的参数优化模型，以期达到工艺参数优化的目的。

5.1 集数值仿真、人工神经网络和遗传算法为一体的参数优化模型

在型材挤压过程中，工艺参数的优化设计是一个组合优化问题，难以用传统优化方法解决。结合遗传算法、人工神经网络和数值仿真技术各自特点，本文构造了如图 8.2-36 所示的参数优化模型。各个模块的功能如下。

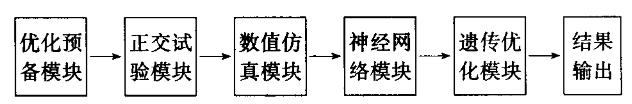


图 8.2-36 工艺参数优化模型

1) 优化预备模块。该模块主要是选择优化目标函数，确定对目标函数影响较大的主要工艺参数，并根据实际经验确定各参数的约束范围。

2) 正交试验模块。该模块根据“正交”原理，规定一个标准格式——正交表，据此安排试验方案，采用它可以用较少的试验来获取有关设计参数的交互影响，从而减少数值模拟的次数。

3) 数值仿真模块。采用塑性有限元法，依据正交试验方法提供的方案进行型材挤压成形过程的数值模拟，以获得相应的目标函数值，为神经网络的训练准备学习样本。同时也对最终优化结果进行仿真，提供对工艺和模具设计有帮助的各种信息。

4) 神经网络模块。根据数值仿真结果作为学习样本对训练所建造的网络模型。在训练结束和测试验证后用来作为优化算法的强大知识源，采用多层人工神经网络的推广应用能力来获得遗传优化所需的目标函数值。

5) 遗传优化模块。采用具有全局收敛性的遗传算法作为优化算法。根据由神经网络模型所获得的目标函数值，对型材挤压过程的主要工艺参数进行组合优化。

6) 结果输出。输出优化所获得的各主要工艺参数，并根据该工艺参数利用数值仿真模块还可输出挤压成形过程的应力应变等结果。

5.2 非对称角铝型材挤压成形工艺参数优化实例

(1) 目标函数的选取

目标函数的选取与具体的研究对象有关。在型材挤压过程中，由于坯料与挤压制品在形状上缺乏几何相似性，并且坯料与挤压筒之间存在剧烈摩擦，使得金属流动极不均匀。各部位的金属都试图以不同的流速流出模孔，但型材作为一个整体却阻碍了这一点的实现，导致所挤压的型材因产生横向裂纹、局部波浪和弯曲等缺陷而报废。因此，型材挤压模具设计时应以平衡金属流速为目标，选择金属流速方均差为目标函数。

流速方均差 S 定义为

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(v_{z,i}-v_{z,av})^2}{N}}$$

式中，N 为所考虑区域的节点数目；$v_{z,i}$ 为规定平面上节点轴向速度；$v_{z,av}$ 为规定平面上平均轴向速度。

优化的目标是挤压成形件的流速方均差为最小。

(2) 设计变量选择及其约束范围

在型材挤压过程中，工作带长度的计算是在一定模孔位置配置下进行的。首先要找到在保证模具强度前提下获得最佳金属流动均衡性的合理模孔位置配置，然后再采用不等长的工作带长度设计使流速波动为最小。角铝型材是通用型材，其两边边长一般不相等，确定其模孔位置配置通常需根据经验，经反复试模才能获得。图 8.2-37 为某角铝型材模模孔位置配置方案图。

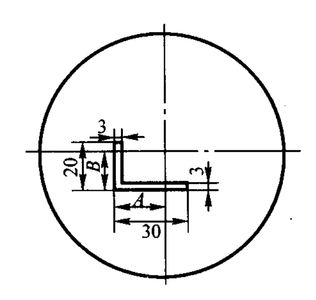


图 8.2-37 角铝型材模模孔位置配置方案图

(3) 步骤与结果讨论

1) 选择模孔位置配置尺寸 A 和 B 为设计变量，流速方均差 S 为目标函数，按照正交试验方法构造各参数间的组合方案。所构造的正交试验水平和因子如表 8.2-2 所示。

表 8.2-2 正交试验水平和因子

水平	因子	
	参数 A/mm	参数 B/mm
1	9	19
2	12	22
3	15	25
4	18	28
5	21	31
6	24	34

2) 针对各个参数组合通过采用塑性有限元法来获得流速方均差 S，从而组成一个学习样本对。由正交试验方法构造的正交表如表 8.2-3 所示。

表 8.2-3 正交表

试验号	参数 A/mm	参数 B/mm	流速方均差 S
1	1	1	0.293
2	1	3	0.289
3	1	5	0.296
4	1	2	0.291
5	1	4	0.293
6	1	6	0.301
7	2	1	0.289
8	2	3	0.289

续表 8.2-3

试验号	参数 A/mm	参数 B/mm	流速方均差 S
9	2	5	0.289
10	2	2	0.291
11	2	4	0.285
12	2	6	0.294
13	3	1	0.286
14	3	3	0.283
15	3	5	0.284
16	3	2	0.284
17	3	4	0.283
18	3	6	0.285
19	4	1	0.289
20	4	3	0.283
21	4	5	0.283
22	4	2	0.284
23	4	4	0.281
24	4	6	0.284
25	5	1	0.284
26	5	3	0.281
27	5	5	0.261
28	5	2	0.283
29	5	4	0.279
30	5	6	0.280
31	6	1	0.288
32	6	3	0.283
33	6	5	0.279
34	6	2	0.285
35	6	4	0.281
36	6	6	0.279

3）建神经网络模型。根据反复试验，选用三层前馈网络，结构参数如下：输入层单元数2个，隐层单元数5个和输出层单元数1个。按表8.2-2的样本对进行训练，训练后的神经网络可以作为知识源库来获取遗传算法所需要的目标函数值。表8.2-4为网络预测值与有限元计算值的比较结果。从表8.2-4可以看出，流速方均差的预测值与有限元计算值之间的误差在5%以内，说明训练结束后网络具有较好的推广性。因此它可以作为后续优化模型的知识源。

表 8.2-4　网络预测值与有限元计算值的比较结果

序号	参数 A/mm	参数 B/mm	流速方均差		误差 e/%
			预测值	计算值	
1	10.1	32.3	0.302	0.315	4.2
2	13.4	20.8	0.277	0.282	1.6
3	16.5	23.7	0.288	0.294	2.0
4	19.3	21.1	0.284	0.281	-1.2
5	20.8	30.5	0.272	0.260	-4.5
6	22.6	31.2	0.279	0.283	1.6

表 8.2-5　目标函数的变化情况

迭代次数	设计变量		流速方均差 S
	A/mm	B/mm	
1	5.1	10.1	0.331
2~3	15.2	19.3	0.289
4~6	18.4	27.6	0.279
8~10	20.6	29.8	0.259

4）采用遗传算法对模具几何参数 A 和 B 尺寸进行优化。群体规模取100，染色体长度取16，杂交概率取0.3，变异概率取0.001和遗传最大代数取8~10。用遗传算法计算所得到的结果见表8.2-5所示。型材质心位置（10.1，5.1）处所得的初始流速方均差为0.331，最终得到的优化最小流速方均差为0.259，流速方均差减少21.6%，表明优化效果显著。最终获得的优化模孔位置配置尺寸 $A=20.6$ mm，$B=29.8$ mm。

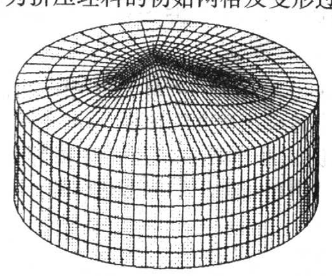
5.3　非对称角铝型材挤压成形过程的数值仿真

（1）有限元模型的建立

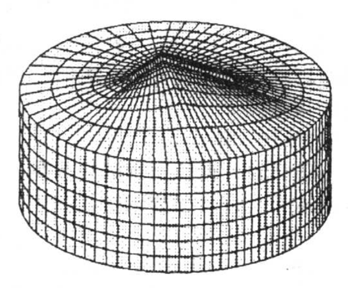
采用经优化配置的模孔位置，在计算机上对非对称角铝型材挤压成形过程进行三维数值仿真。为了减少计算时间，对初始坯料进行了非均匀性离散，离散后的网格如图8.2-38a所示。该模型采用八节点六面体单元，共5 696个节点，4 724个单元。

（2）模拟结果分析

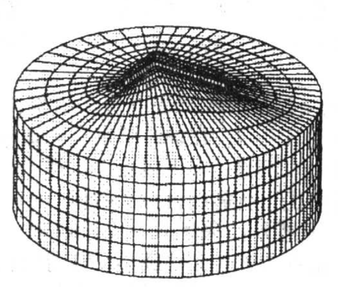
图8.2-38为挤压坯料的初始网格及变形过程中网格畸变



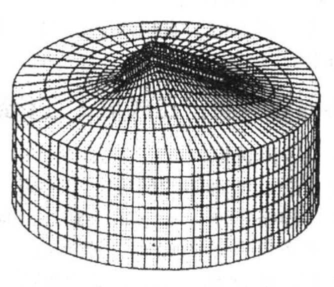
(a) 增量步为0



(b) 增量步为78



(c) 增量步为104



(d) 增量步为170

图 8.2-38　挤压不同变形阶段时的网格畸变情况



情况。可以看出，随着变形量的增加，变形区域的网格畸变愈加严重。但挤出端部金属高度较一致，表明优化配置的模孔位置合理，有利于进一步挤压成形。

（3）试验验证

为了验证本文提出的集数值仿真、人工神经网络和遗传算法为一体的工艺参数优化模型的正确性，根据上节获得的非对称角铝型材挤压模模孔位置的优化结果，设计了角铝型材挤压模（如图 8.2-39 所示）。在生产厂家进行了现场试验，一次试挤成功，无需修模，产品尺寸完全符合图样要求。图 8.2-40 所示为角铝型材挤压成品照片。表明工艺参数优化模型的建立是正确和可行的。



图 8.2-39　角铝型材挤压模

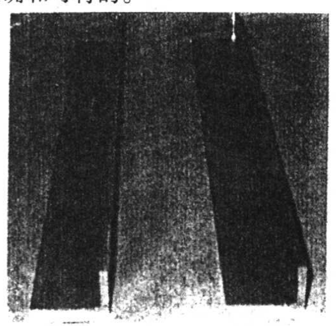


图 8.2-40　角铝型材挤压成品相片

编写：夏巨谌（华中科技大学）
闫　洪（南昌大学）



第3章　铝合金型材挤压工艺

1　挤压坯料的选择

挤压铝合金型材时，主要采用实心圆断面坯料。在个别情况下，如采用异形挤压筒挤压大头型材时，才使用矩形或扁平椭圆形等异形坯料。空心圆断面坯料用得较少，当挤压内孔形状简单，尺寸较大的空心型材时才使用。因此，下面仅讨论实心圆断面坯料尺寸的确定问题。

(1) 使材料利用率最高

对于挤压一定类型尺寸的型材来说，坯料的直径越大、长度越长，即坯料的体积越大，则所挤压出的型材就越长。增加型材的长度，可以减少型材制品末端的切头部分，有助于提高材料利用率。因此，在选择坯料尺寸时，最基本的要求是使坯料的体积达到最大值。

但是，消耗在挤压残料中的金属部分对材料利用率的高低也有很大影响。当坯料体积一定时，增大直径 D 和长度 L 对消耗在挤压残料中的金属有不同影响。例如，当增大坯料直径并相应地减少其长度时，则残料消耗相对增加，材料利用率就下降。反之，增加坯料长度并相应地减小直径时，则残料消耗就相对减少。此外，减小坯料直径，既可减小变形的不均匀性，又可减少缩尾形成的深度。

有关文献介绍了挤压残料的大小与挤压筒直径的关系：

挤压筒直径/mm：95，130，170，230，270，360，420，500；

残料高度/mm：25，30，40，50，60，80，100，120。

通常，残料高度 $h_{残}$ 与挤压筒直径 D 之比为 $h_{残}=(0.22\sim0.25)D$。

(2) 使挤压力最小

当坯料的体积一定时，坯料的长度与直径之比应选择在使挤压力最小。正挤压时，坯料高径比 h_0/d_0 过大，必然会增大摩擦阻力，进而增大挤压力，如图 8.3-1 所示。由图可知，挤压力增大倍数随高径比 h_0/d_0 的增大而增大，为了不使单位挤压力超出许用值，一般应限制 h_0/d_0 的范围。

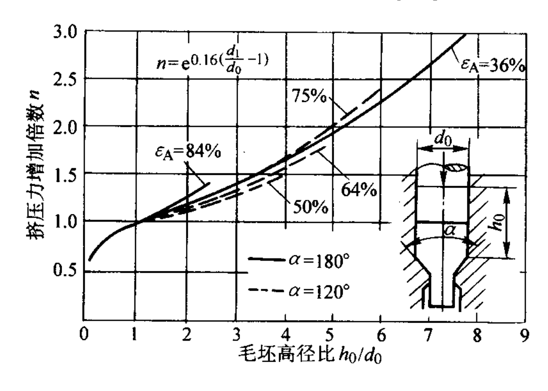


图 8.3-1　坯料高径比对挤压力的影响

2　挤压温度与速度的确定

2.1　挤压温度范围的确定

挤压铝合金型材时，合理的挤压温度范围应基于以下两点来确定，即

1) 金属的塑性高，可以采用高速挤压而不产生裂纹。

2) 金属的变形抗力尽可能小，在不超过容许的单位压力下，可以采用长径比较大的坯料和大的挤压系数进行挤压。

除了上述两条外，在挤压具有挤压效应的铝合金时，合理的温度范围还应保证挤压出的型材具有最高的强度并使晶粒不均匀性最小。

(1) 挤压过程中的温度变化

挤压温度和挤压速度是挤压过程中的两个基本参数。尽管挤压变形具有优越的三向压应力状态。但由于变形不均匀性导致金属沿锭坯断面的流速差，会发生大的纵向拉应力，甚至引起制品产生周期性表面裂纹。在这种情况下，为了保持挤压制品的整体性，在挤压过程中，塑性变形区的温度必须与金属塑性最好的温度范围相适应。

塑性变形区的温度取决于坯料和工具的加热温度、变形热以及被周围介质所吸收的热量。挤压速度或金属流动速度越大，被周围介质吸收的热量就越小，则塑性变形区的温度就越高，反之亦然。在一定的变形程度下，或者是选择合适的预热温度，或者是选择合适的变形速度，都可以使塑性变形区的温度保持在规定的范围内，当变形速度较小时，必须提高预热温度。而变形速度较大时，则必须降低预热温度。因此，利用“锥形”加热和冷却模具的方法可获得较高的挤压速度。

随着挤压条件的变化，挤压过程中的挤压温度和挤压速度是不断变化的。

在挤压铝合金时，挤压温度较低（400～500℃），挤压速度很慢（≤25 mm/s），而且铝合金的导热性很好，所以在计算塑变区的温度场时必须考虑由于挤压金属的热传导和金属与挤压工具之间的热交换而引起的温度变化。

温度变化的简化计算公式为：

$$\Delta t=3.5\times10^{-6}\cdot P_0 r-\Delta t_0(1-e^{1.6}\sqrt{\eta/P_e})$$

在 1.44～10.5 mm/s 的速度范围内挤压棒材时，在各个挤压阶段中，坯料表面温度的计算值和试验值基本符合（见图 8.3-2)，说明上述公式在工程计算中是适用的。

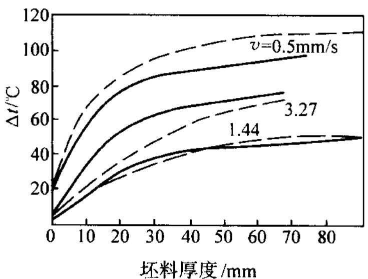


图 8.3-2　在挤压 2A12 合金棒材的过程中塑变区温度的变化
(挤压系数为 10，$t_{始}=t_{终}=390$℃) 虚线—计算值；实线—试验数据

在挤压过程中的温升对工具的温度和挤压力的大小都有一定的影响，因此，在设计和使用挤压工具时均应充分考虑这一因素。

(2) 挤压时的温度条件

在确定挤压的温度制度时，应该考虑以下一些因素：

1) 合金的塑性图与状态图，了解合金最佳塑性温度范围和相变情况，避免在多相和相变温度下变形。

2) 挤压过程温度条件的特点，影响温度条件变化的因素和调节方法以及温升情况。

3) 尽可能地降低变形抗力以减小挤压力和作用在工具上的载荷。



4）保证挤压制品中的温度分布均匀。

5）保证最大的挤出速度。

6）保持温度不超过该合金的临界温度，以免塑性降低产生裂纹。

7）保证挤压时金属不黏结工具，影响制品表面质量。

8）保证制品的组织均一和力学性能最佳。

9）保证制品的尺寸精度。

在确定挤压时的最佳温度制度时，还应该考虑铸锭的冶金学特点：

1）结晶组织的特点。

2）合金化学成分的波动。

3）金属间化合物的特点。

4）疏松程度、气体和其他的非金属与金属杂质的含量等。

常用铝合金挤压时锭坯的加热温度（见表 8.3-1），可供制订工艺和设计模具时参考。

表 8.3-1　常用铝合金的温度-速度规程

合　金	制　品	温　度/℃		平均挤出速度 /m·min⁻¹
		锭　坯	挤压筒	
2A14	圆棒、方棒、六角棒及通用型材	380～440	360～440	1～2.5
2A12		380～440	360～440	1～3.5
2A50		380～440	360～400	3～6
2A80、2A70、5A02		320～430	350～400	3～15
7A04		350～430	330～400	1～2
1050A、1035		390～440	360～430	40～250
3A21		390～440	360～430	25～100
5A05、5A06		400～450	480～440	1～2
6A02、6063、6061		430～510	400～480	3～15、6063 合金可达到 120
2A12	一般用途型材	380～460	360～440	1～2.5
	高负载型材、空心型材	430～460	400～440	0.8～2
	大头型材、壁板	420～470	400～450	0.5～1.2
2A11	一般用途型材	330～460	360～440	1～3
7A04	等断面型材、大头型材	370～450	360～430	0.8～2
	壁板	390～440	390～440	0.5～1
5A02、5A03、5A05 5A06、5B06	实心和空心型材、壁板	420～480	400～460	0.6～2
6063	装饰型材	320～500	300～450	到 120
6063、6A02	空心建筑型材	400～510	380～460	8～60、6063 合金可达到 100
6A02	重要用途型材	490～510	460～480	3～15

2.2　挤压时的速度条件

挤压时的速度有三种：挤压速度 v_j 为挤压机主柱塞、挤压杆和挤压垫的移动速度；金属流出速度 v_L 为金属流出模孔时的速度，$v_L=\lambda v_j$；变形速度 $\dot{\varepsilon}$，亦称变形速率，$\dot{\varepsilon}=\partial\varepsilon/\partial t$。

在生产中，最常用的是挤压速度 v_j 和挤出速度 v_L。了解挤压速度便于正确控制挤压时的挤压杆前进速度。挤出速度反映合金可挤压性的高低。

挤压时的速度与温度是联系在一起的。一般来说，提高挤压速度则必须降低锭坯的加热温度；反之，提高了挤压温度则必须降低挤压速度。

挤压力是被挤合金变形抗力的函数，热加工的目的，是为了利用金属材料在高温下屈服应力下降这一现象来实现大的变形量。具有高变形抗力的合金必须加热到很高的变形温度。但是，如果锭坯原始温度和挤压速度导致制品出口温度非常接近该合金的固相线温度时，则表面将产生裂纹、粗糙、质量变坏。图 8.3-3 为最大速度和出口温度之间的关系曲线。图中给出了两条极限曲线：一条表示设备能力的最大挤压力曲线，超过它不可能实现挤压；另一条表示合金制品开始开裂的冶金学极限。两条曲线之间的面积提供了该合金挤压时所有的加工工艺参数，特别是在交点上提供了理论上最大速度和相应的最佳出口温度。应强调的是这个最佳值只是从挤压速度角度出发，不一定能满足制品的物理-冶金性能要求。

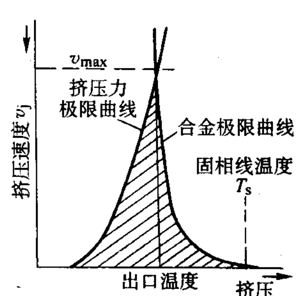


图 8.3-3　挤压速度极限图

在确定常规挤压时的实际金属流出速度时，可在已知挤压温度的基础上综合考虑材料与工艺参数（如金属变形抗力与塑性、挤压比、流动不均匀的特性、工模具结构形式及预热条件）以及设备条件的影响。



表 8.3-1 给出了常用的一些铝合金挤压各种型材时的锭坯、挤压筒加热温度和平均的挤出速度。

3 挤压方法的选择

3.1 等截面实心型材的挤压方法

等截面实心型材有三种基本挤压方法可供选择：即正挤压、反挤压和正反复合挤压。

(1) 挤压

这种挤压方法如图 8.3-4a 所示。当挤压轴 1 沿箭头所指的方向运动时，通过挤压垫片 2 将压力传给在挤压筒 4 内移动着的坯料 3。此时，坯料的金属经过安装在模支承 6 内的模孔 5 流出，形成型材 7，型材横断面的形状和尺寸与模孔的形状和尺寸相符合。在上述过程中，型材的流出方向与挤压轴的移动方向一致，这就是所谓正向挤压法。

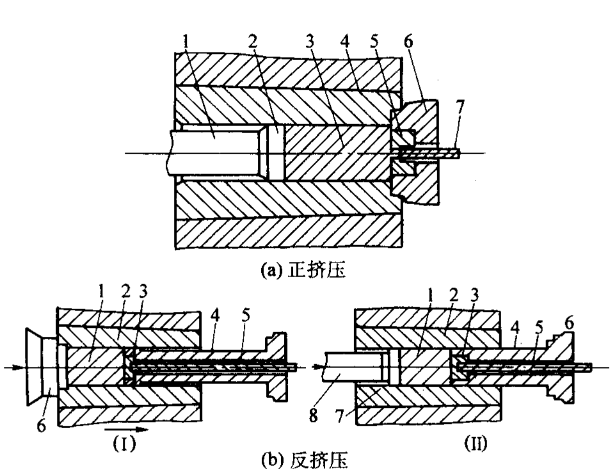


图 8.3-4 等截面实心型材正挤压与反挤压示意图
Ⅰ—通过挤压筒传递压力；Ⅱ—通过坯料传递压力

(2) 反挤压

挤压铝合金型材时，采用两种基本类型的反向挤压，其区别在于作用力对坯料的传递方法不同。

当采用第一类挤压方法（图 8.3-4bⅠ）时，从挤压机主缸产生的挤压力通过挤压轴（封住挤压筒的堵头 6)、再经过挤压筒 2（按箭头的指示方向运动）传递给坯料 1。另一方面，在挤压筒的另一端，用加长的模支承 4 封住坯料，在模支承内固定着挤压模 3。当挤压筒和坯料一起移动时，迫使金属流入模孔，形成型材 5。

采用第二类方法时（图 8.3-3bⅡ)，与正向挤压时相同，由挤压轴 8 通过挤压垫片 7 将挤压力传递给料 1。

当挤压轴 8 按箭头的指示方向移动时，依靠摩擦力使挤压筒 2 与坯料一起移动，金属经过安装在模支承 4 上的模子 3 流出，形成型材 5。

(3) 复合挤压

在挤压筒行程较小的挤压机上可以采用复合挤压的方法，如图 8.3-5 所示。

将坯料 4 放入挤压筒 3 中并进行镦粗填充挤压（图 8.3-5a)。然后卸去挤压力，打开锁键，把加长的模支承 6 和固定在上面的模子 5 从挤压筒内退出。用挤压轴 1 通过挤压垫片 2，把坯料 4 推动到模支承处（图 8.3-5b)。把压型嘴靠近挤压筒，关闭锁键，进行反向挤压（图 8.3-5c)。当挤压筒行程终了时，这个阶段即告完成（图 8.3-5d)。此时，模支承完全（到挡板处）进入挤压筒中，自动进行正向挤压（图 8.3-5e)，当获得所需长度的型材时，正向挤压过程即告结束。

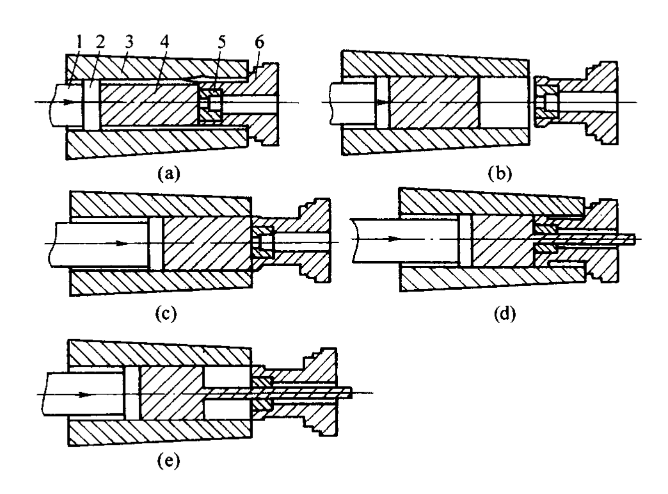


图 8.3-5 等截面实心型材复合挤压示意图

在挤压过程中的第一阶段，采用反向挤压可减少整个挤压力的 18%～30%。

3.2 等截面空心型材的挤压方法

根据等截面空心型材的外形、孔的数目（在单孔挤压时，根据孔的断面形状、尺寸)、孔对型材断面中心位置的非对称分布程度等因素，可以采用两种基本方法进行挤压。

1) 对于空心坯料或实心铸锭时可以采用管材挤压法（带挤压针）挤压；当采用实心铸锭时，在挤压之前，先要对坯料进行穿孔。

2) 利用组合（舌型）模进行焊合挤压，在这种情况下，将组合针和模子做成整体或者装配成刚性结构。这种结构有时又称带组合针的模子。

(1) 坯料对挤压筒和挤压针作相对移动的挤压

这种挤压方法有两类。第一类只能在挤压针带有独立传动机构的挤压机（带穿孔系统的）上才可能实现。挤压针（图 8.3-6a）安装在挤压针支承上，通过空心挤压轴，相对挤压模把挤压针调整到一定位置（在整个挤压过程中挤压针的位置是不变的)。

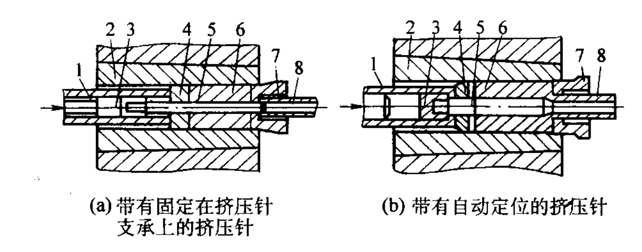


图 8.3-6 有相对移动的空心型材挤压示意图

当挤压轴 1 按箭头所示方向移动时，通过挤压垫片 4 将挤压力传递给坯料 6。坯料相对于挤压筒 2 和固定的挤压针 5 移动，流入模孔 7 中，形成空心型材 8。采用这种方法挤压时，挤压针是不动的，因此，有时把这种方法叫做带固定挤压针的挤压。

这种挤压方法的第二类是采用所谓游动的或自动定位的挤压针，这和拉伸管材时游动芯头相类似（图 8.3-6b)。具有阶段形状的挤压针在金属流动过程中，保证摩擦力（引导挤压针向模子方向）和坯料对挤压针过渡区的压力（沿相反的方向作用）之间相互平衡。这种挤压也可以在不带挤压针的独立传动机构的挤压机上进行（无穿孔系统的)。

(2) 坯料对挤压筒和挤压针无相对移动的挤压

这种挤压方法和以上所述的反向挤压实心断面型材的方



法一样（见图 8.3-4bⅠ和Ⅱ），分为两类（图 8.3-7a 和 b）。两者区别只在于，采用第一类方法是，将挤压针 2 拧入短挤压轴（堵头 1）上。采用第二类方法时，将挤压针拧入普通挤压轴 1 上。在这两种情况下，带挤压针的挤压轴，挤压筒 3 和坯料 4 作为一个整体运动，在进入变形区之前，金属对挤压针不发生运动。在上述过程中，只有在模子 5 附近的塑性区内，坯料才发生剧烈的压缩，而且金属相对于挤压针产生移动。这种移动速度在变形区开始时为零，到变形区终了时达到最大值。

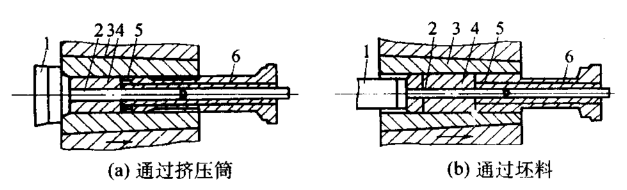


图 8.3-7 无相对移动的空心型材挤压示意图

成品型材 6 对挤压针的移动速度等于这个最大值，即：

$$v_{om} = v_{np}(\lambda - 1)$$

式中，v_{np} 为挤压速度，等于挤压针的移动速度；λ 为挤压系数。

（3）坯料对挤压筒无相对移动，但对挤压针有相对移动的挤压

这种方法与图 8.3-7b 所示的方法相似，即挤压力是通过坯料而传递的，其区别只是将挤压针固定在挤压轴内的挤压针支承上。挤压针支承带有独立的传动装置，不依赖挤压轴的传动而能单独的移动挤压针。和正向挤压相同，挤压针相对模子是不动的。只是模子的端头相对挤压筒端头的位置发生变化。挤压筒也和坯料一起移动。

（4）坯料相对挤压筒移动，但相对挤压针不移动的挤压

挤压示意图如图 8.3-8 所示。当挤压轴 1（在其上拧入挤压针）按箭头所示方向移动时，通过挤压垫片 2 将压力传递给坯料 4。金属对挤压筒 5 作相对移动，流入模子与挤压针之间的间隙，形成规定外形的空心型材 7。

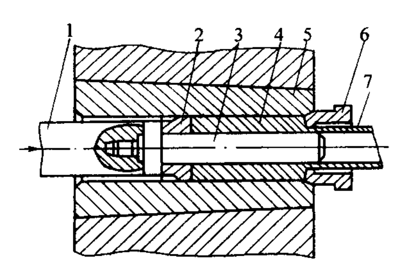


图 8.3-8 坯料相对挤压筒移动相对挤压针不移动的空心型材挤压示意图

挤压时，挤压针和未来坯料相对挤压筒同时移动，有时把这种挤压过程叫做带移动针挤压。采用这种挤压方法时，在进入变形区之前，金属对挤压针实际上没有摩擦力，这和反向挤压是相同的。同时，由于坯料对挤压筒作相对移动，在挤压筒的内表面上产生摩擦，这是正向挤压所具有的特点。因此，有时把这种挤压过程叫做半反向挤压。

因为这种挤压过程既不需要单独移动挤压针，又不需要移动挤压筒，不需要加长压型嘴的行程，因此这种方法可以在任何一个型 - 棒材挤压机上采用。这正是这种挤压方法的主要特点和比其他挤压方法优越的地方。

（5）焊合挤压

当采用组合模挤压空心型材（图 8.3-9）时，它与上述利用空心坯料挤压空心型材的方法不同之点在于挤压时采用实心坯料。用组合模的挤压过程叙述如下。将坯料 4 放入挤压筒中 2（图 8.3-9a）。在填充挤压和以后的挤压过程中，在挤压轴 1 通过挤压垫片 3 所传递的压力作用下，坯料被模子 5 分成两股或两股以上的金属流（根据模具的结构而定）。这些金属流在高压作用下，围绕着与模桥组成一个整体的组合针（舌头）在模子的焊合室内被重新焊合（图 8.3-9b）。最终在模孔和组合针的缝隙之间形成型材 7。

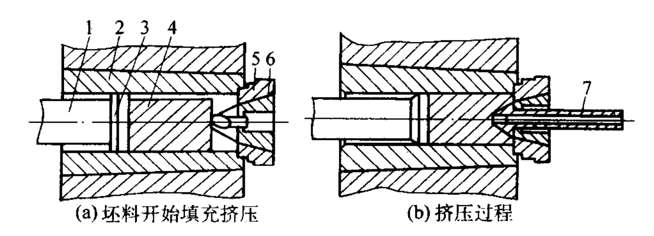


图 8.3-9 组合模挤压空心型材的示意图

上述挤压过程的主要特点在于先把坯料分成几股金属流，随后再将该金属流焊合在一起。因此，近来也把这种挤压方法叫做焊合挤压。

3.3 阶段变断面实心型材的挤压方法

（1）分步挤压基本型材部分和大头部分的挤压法

按照这种方法，用单独的挤压模挤压型材各个断面，每个挤压阶段结束以后，便更换模子（图 8.3-10）。

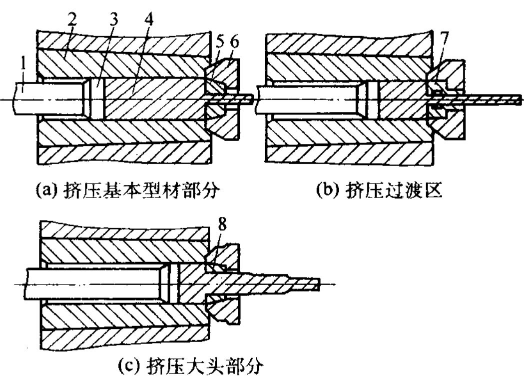


图 8.3-10 三个可拆卸模挤压阶段变断面型材的示意图

1—挤压轴；2—挤压筒；3—挤压垫片；4—坯料；
5—挤压基本型材部分用的模子；6—模支承；
7—挤压过渡区用的模子；8—挤压大头部分的模子

（2）同时挤压基本型材部分和大头部分的挤压法

可以采用几种方法同时挤压基本型材部分和大头部分。其中一种方法（图 8.3-11）是在挤压筒内放入 100 ~ 150 mm 长的可卸模，用来挤压型材的大头部分，同时在模支承内安装挤压基本型材的可卸模。变形金属首先充满大头模子的模腔，而后再通过基本型材断面的模孔挤压型材。当挤压过程结束时，将挤压残料和大头模子一起从挤压筒内推出，拆掉两套模子并用锯切掉挤压残料。也可以采用穿孔方法分离残料（用穿孔装置把残料挤出）。

按上述方法挤压阶段变断面型材时所需要的单位压力要比分步挤压型材部分和大头部分高得多。这是因为挤压金属和工具的摩擦表面显著增加，金属流入型材模孔之前由于流过大头模模腔产生变形和冷却，发生了强化。因此，建议上述挤压方法只用于挤压长度不大的，挤压系数比较小的型材。

（3）采用异形挤压筒的挤压方法

挤压断面形状简单而且长度不大的型材大头部分时，可在挤压筒内孔的横断面形状与型材大头部分的横断面形状相同的挤压筒内进行挤压（图 8.3-12）。



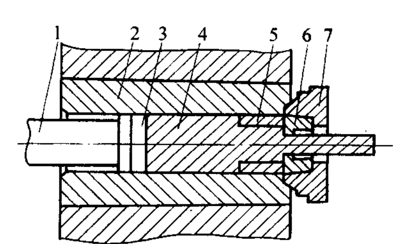


图 8.3-11 两套可拆卸模挤压阶段变断面型材示意图
1—挤压轴；2—挤压筒；3—挤压垫片；
4—坯料；5—大头部分成型模；
6—挤压型材部分的模子；7—模支承

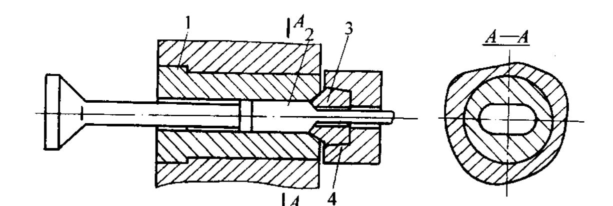


图 8.3-12 异形挤压筒挤压阶段变断面型材的示意图
1—挤压筒内套；2—铸锭；3—模子；4—模支承

(4) 阶段变断面型材反向挤压法

上述所有挤压阶段变断面型材的方法不仅可以采用正向挤压法，也可以采用反向挤压法。用反向挤压法挤压阶段变断面型材时可降低挤压力 25% ~ 30%，还可降低挤压温度、增加铸锭长度、提高金属流动速度。此外，用反向挤压法挤压大头部分时可减小挤压残料的长度，可消除型材宏观组织的主要缺陷粗晶环。

国内工厂现在的型-棒挤压机的挤压筒行程长度较短，是限制广泛采用反向挤压法挤压阶段变断面型材的主要因素。

(5) 用带有纵向可移动部件的模子挤压阶段变断面型材

该方法是用一个有移动部件的模子来挤压基本型材部分和大头部分。模子的活动部件可沿挤压方向自由移动。

采用这种方法挤压时（见图 8.3-13)，必须制造带有立槽的模支承、支承锁、挤压基本型材部分和前端大头部分专用的可卸模和挤压后端大头部分的可卸模。

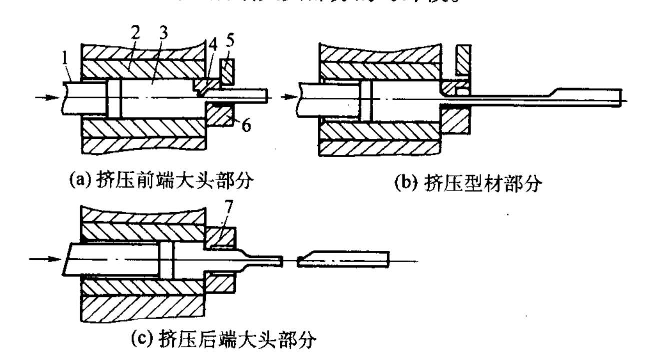


图 8.3-13 带有纵向可移动件的模子挤压阶段变断面型材的示意图
1—挤压轴；2—挤压筒；3—坯料；4—模子的移动件；
5—半支承环；6—挤压前端大头部分和型材部分的固定模；
7—挤压尾端大头部分的固定模

专用模子是由下固定件、两个上活动件、模子半支承环所组成。有两个工作带，当活动件处于某一位置时，上活动件每个工作带分别和模子下固定件的工作带一起组成挤压大头部分的模孔或者组成挤压型材基本断面的模孔。

(6) 利用反压力挤压阶段变断面型材

近几年来研究出了一种挤压阶段变断面型材（带一个大头和两个大头部分）的新方法。这种方法是以反压力挤压为基础的，其原理是利用前端的活动挡板使从模孔中挤压出的型材的前端产生变形。

挤压工作原理见图 8.3-14。型材的大头部分是当基本型材部分镦粗时在模子的出口处形成的。镦粗是由于挡板所给的反压力而形成的。挡板紧靠着变形垫料。反压力的大小取决于垫料挤入支承模时的变形程度、垫料的强度特性和垫料与支承模工作表面接触部分的摩擦情况。

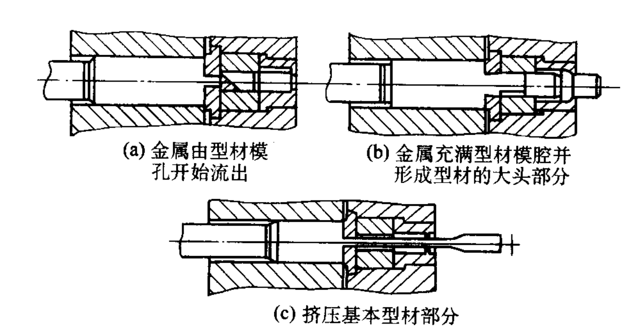


图 8.3-14 用反压力挤压阶段变断面型材的示意图
（反压力通过活动挡板传给变形垫料）

型材模腔的几何尺寸决定型材过渡区的形状和尺寸，而垫圈孔的形状及几何尺寸决定型材前端大头部分的形状和尺寸。

3.4 渐变断面实心型材的挤压方法

在工业上主要采用带活动件的模子的挤压方法来挤压渐变断面实心型材。活动件在挤压过程中沿径向移动。利用仿形导向装置保证活动件的移动，导向装置与挤压机的前机架相连接（见图 8.3-15)。这种方法有两种类型：即在挤压过程中减小或者增大模孔的横断面尺寸。

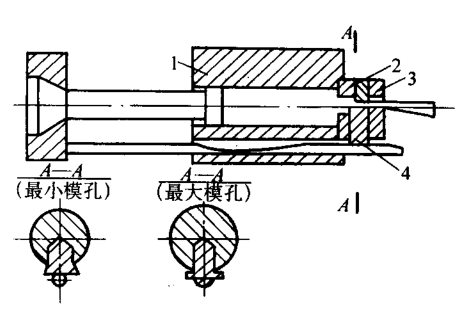


图 8.3-15 渐变断面型材挤压示意图
1—挤压筒；2—导环；3—模子的固定件；4—模子的活动件

按照第一种方法，仿形导向装置的断面高度随挤压过程的延长而增大。当装在前机架上的挤压轴移动时，仿形导向装置使模子的活动件挤压金属，减小了模孔的断面，保证挤压型材的厚度相同。当用高强度铝合金生产逐渐变断面型材时，用这种挤压方法能挤压厚度减小梯度很小的型材。否则作用在仿形导向装置上的负荷急剧增加，这将引起仿形导向装置的损坏和破坏挤压过程。

第二种方法没有上述缺点，因为活动件依靠挤压金属的径向压力而使活动件松开，使模孔的横断面尺寸逐渐增大。在这种情况下，仿形导向装置只起导向作用，限制活动件的径向运动，保证缘板的厚度沿型材长度按规定要求而变化。

4 润滑剂的选用

挤压铝合金型材时，采用润滑剂是为了提高金属流动速度防止产生粗晶环、减少沿型材长度上组织和性能的不均匀



性、降低挤压力以及提高型材横向几何尺寸的精确度。

挤压铝合金时，在黏性矿物油中添加各种填料的悬浮状润滑剂得到了广泛的应用。例如，广泛采用含 15%～25%鳞片状石墨和 85%～75%汽缸油的润滑剂。在毛料上涂抹这种润滑剂时，油燃烧了，在坯料的表面留下由石墨和润滑剂燃烧物所组成的密实层。此层在变形金属与工具的接触表面上形成相当坚实的薄膜。但是这层薄膜的弹性不够，在挤压时、特别当挤压系数很大时，薄膜出现局部断裂。这将使变形金属与工具（例如挤压筒）之间发生直接接触，使金属粘附在工具上，使挤压型材的表面上起皮。

有关文献中指出，在润滑剂成分中加入表面活性的物质可以大大改善性能，形成一个塑化层，使金属接触表面上的主要剪切变形集中于此。

在挤压铝合金时，已熔的易熔金属（例如铅或锡）可以作为润滑剂中的表面活性物质。

含有铅化合物的润滑剂具有以下成分（质量分数）：8%～20%铅丹、10%石墨、10%滑石、其余为瓦波尔 T 汽缸油。也有的文献中推荐了成分相似的润滑剂：15%氧化铅、7%石墨、7%滑石、其余为光亮油。以锡盐为基的润滑剂具有下列成分：①5%～7%油酸锡、15%～25%石墨、其余为瓦波尔 T 油；②5%～7%硬质酸锡、15%～25%石墨、其余为瓦波尔 T 油。

这些润滑剂的作用原理在于和铝发生化学反应而析出铅（锡），在挤压温度下以熔融状态（液体）进入润滑膜的成分中，使润滑膜塑化。

正如广泛的工业性研究所指出，利用上述润滑剂可以造成稳定的润滑剂薄膜从而显著地降低所需的挤压力；并有可能降低坯料的加热温度，进而提高挤压速度。

以铅化合物为基的润滑剂比以锡化合物为基的润滑剂的效果更好。但是，由于前一种润滑剂有毒，所以在挤压筒和挤压机出料台旁应设置大功率的抽风装置。

5　铝合金型材的生产工艺流程

挤压各种型材是生产中的主要工序。其他工序取决于型材的供应状态。

热挤压状态下供应的型材，在挤压后进行以下工序：拉伸矫直；锯切夹头；用扭拧的方法矫直其纵向和横向的几何形状；在辊式矫直机上矫直和压平；切取试样；做力学性能试验和切成定尺。型材有不做力学性能试验的情况下交货时，当几何形状矫完以后，马上切成定尺，最后一道工序是技术检查和验收型材。

在退火状态下供应的型材，挤压后进行退火。其余工序的顺序与上述的相似。但是如果型材在挤压后，其几何形状具有很大的纵向弯曲时，则型材在退火前要进行拉伸矫直。

在淬火及自然时效状态下供应的型材，挤压后进行淬火。在淬火及人工时效状态下供应的型材，在矫直和精整几何形状以后进行人工时效。淬火后的工序顺序也和生产热挤压状态下供应的型材相同。

图 8.3-16 给出了各种状态下的铝合金挤压型材的一般工艺流程。

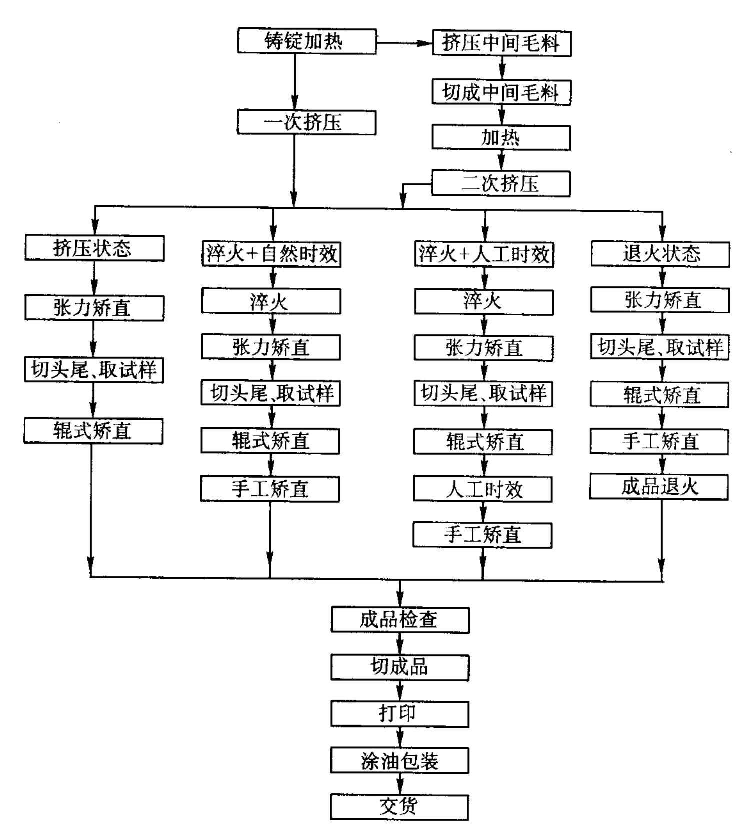


图 8.3-16　铝合金型材生产的一般工艺流程图

编写：夏巨谌（华中科技大学）
闫　洪（南昌大学）



第4章　铝合金型材挤压模具设计

1　铝型材挤压工模具的工作条件

通过以上分析可以看出，在挤压过程，挤压工模具的工作条件是十分繁重的。随着挤压产品品种的增加和规格大型化、形状复杂化、尺寸精密化、材料高强化以及大型的高比压挤压筒和新的挤压方案的不断出现，挤压工模具的工作条件变得更为恶劣了，对它们的要求也越来越高了。下面概括地分析一下铝合金挤压工模具的使用条件及其损坏原因：

1）承受长时高温作用。金属的热挤压是在高温下进行的，挤压前的铸锭加热温度，镁合金为350~450℃，铝合金为400~450℃，加上在挤压过程中由于摩擦生热与变形功热效应产生的温升，更提高了金属的变形温度。直接与高温铸锭接触并参与变形的挤压工具（挤压筒、挤压垫片、针后端、冲针等）和模具（模子、模垫、针尖、舌模套、模支承等）的表面温度有时局部可高达550℃以上。承受高温作用的时间一般为几分钟到几十分钟，对于挤压速度慢的难变形铝合金来说，有时长达数小时以上。长时间的高温作用，大大地恶化了金属与工具之间的摩擦条件，降低了工模具材料的强度，以至于产生塑性变形，加速其破损。

2）承受长时高压作用。为了实现挤压变形，金属和工具都需要承受很高的压力。生产实践表明，使金属产生塑性变形所需的单位压力与合金品种有很大的关系。表8.4-1列出了轻合金挤压成形时所需的最小比压。为了获得不同的比压以满足不同合金和品种变形的要求，设计和制造了具有不同比压的挤压机和挤压筒。表8.4-2列出了部分挤压筒的比压。

表8.4-1　铝合金挤压成形所需单位压力

合金与品种	所需的最小单位压力/MPa
纯铝产品	100~150
铝合金普通型、棒材	200~400
铝合金壁板和空心型材	450~1 000
冷挤压产品	600~1 200

表8.4-2　部分挤压筒的比压

挤压机能力/MN	挤压筒规格/mm	比　压/MPa
3.5	60、80、100	1 296、697、446
4	85、100	705、510
5	60、85、95	1 769、881、706
6	85、100、120、135	1 057、764、530、419
6.3	75、85、95	1 426、1 110、889
7.5	85、95	1 322、1 059
8	85、95、110	1 410、1 129、842
12	95、115、130	1 693、1 155、904
15	130~250	1 130~305
16.3	140~200	1 059~519
25	200、250、300	796、509、354
31.5	200~355	1 003~318

续表8.4-2

挤压机能力/MN	挤压筒规格/mm	比　压/MPa
35	200~420	1 145~253
50	300~500	708~255
72	360~600	708~255
80	360~650	786~241
90	385~720	825~236
125	420~800	903~249
200	650~1 100	603~210
20	150、170、200	1 132、882、637

可见，工模具在挤压时需要承受很高的单位压力，加上高温和长时间的作用，有时甚至会超过模具材料的许用应力而损坏，特别是近年来随着挤压技术的发展，挤压工艺不断强化，出现了很多新的工艺方法，如等温挤压、静液挤压、高速冷挤压、连续挤压等，这些工艺方法要求工模具具有更好的性能。

3）承受激冷激热作用。计算和生产实践表明，穿孔针、模子和挤压垫片等工具，工作时间和非工作时间的温差，挤压铝合金时可达200~300℃以上，而在水冷模挤压、穿孔挤压时，工模具中的温度梯度更大，变化更激烈，加之，工模具材料的传热能力较低，很可能在工模具中产生大的热应力，使其工作条件更为恶化。在激冷激热作用下，工模具极易产生微裂或热疲劳裂纹。

4）承受反复循环应力作用。挤压过程本身就是一个周期性的间歇式操作过程。在工作时间，工模具要承受很高的压力，而在非工作时间里则突然卸载，应力下降到零，而且，有的工具（如穿孔系统的工具）在挤压过程中有时受压，有时受拉，因此，工模具部件中的应力状态是极其复杂和极不稳定的。在这种反复循环，拉压交变的应力作用下，工模具极易产生疲劳破坏。

5）承受偏心载荷和冲击载荷作用。在穿孔和挤压时，特别在挤压复杂断面型材、空心型材、大直径小内孔的厚壁管材时，工模具内会产生很大的附加应力，或引起很高的应力集中。在细长件、薄壁空心件（如实心和空心挤压轴，穿孔针组件等）中，还会受到偏心载荷、冲击载荷、扭曲和横向弯曲应力的作用。主应力和这些附加应力迭加，会形成很高的工作应力。在这种复合应力的作用下，工模具最易丧失其稳定性、产生弯曲、扭断或折断。

6）承受高温高压下的高摩擦作用。铝合金在挤压时的主要特点之一是极易与工模具表面产生“黏结”作用，即在高温高压作用下，合金中的V、Fe、Si等溶质原子渗透到工模具表面层而产生焊合作用，在与高温金属直接接触的挤压筒内套、穿孔针和模子等的表面粘附一层金属。在高温高压作用下，这些粘附的金属层不断形成，又不断被破坏，经多次反复磨损，而引起工模具失效。

7）承受局部应力集中的作用。由于产品形状比较复杂，相应的模具和工具（如扁挤压筒、轴，舌模和平面分流组合模等）的形状和结构也比较复杂，因而在高温高压下容易产生局部的应力集中，从而引起局部变形或局部压塌。这种局部变形（如挤压轴端部的局部镦粗等）经局部修理后，削弱



了工具的强度，使之工作条件更为恶劣，因而更易损坏。

通过以上分析可知，在穿孔或挤压时，工模具的工作条件是十分恶劣的，引起其变形和损坏的因素也是错综复杂的。因此，在设计时应尽可能考虑各种不利因素的影响，选择合理的结构，进行可靠的强度校核，规定合理的加工工艺和热处理工艺选择合适的材料。

2　型材挤压模具的分类及组装方式

2.1　型材挤压模具的分类

型材挤压模具的分类如下：

1）按模孔压缩区断面形状可分为：平模、锥形模、平锥模、流线形模和双锥模等，如图 8.4-1 所示。

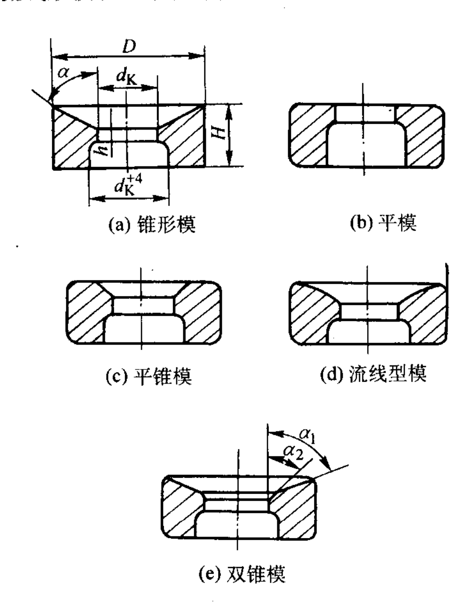


图 8.4-1　挤压模的模孔压缩区断面形状

2）按被挤压的产品品种可分为棒材模、普通实心型材模、壁板模、变断面型材模和管材模、普通管材模、空心型材模等。

3）按模孔数目可分为单孔模和多孔模。

4）按挤压方法和工艺特点可分为热挤压模、冷挤压模、静液挤压模、反挤压模、连续挤压模、水冷模、宽展模、卧式挤压机用模和立式挤压机用模等。

5）按模具结构可分为整体模、分瓣模、可卸模、活动模、舌型组合模、平面分流组合模、嵌合模、插架模、前置模、保护模等。

6）按模具外形结构可分为带倒锥体的锥形模、带凸台的圆柱形模、带正锥体的锥形模、带倒锥体的锥形-中间锥体形压环的模具、带倒锥的圆柱-锥形模、加强式模具等，如图 8.4-2 所示。

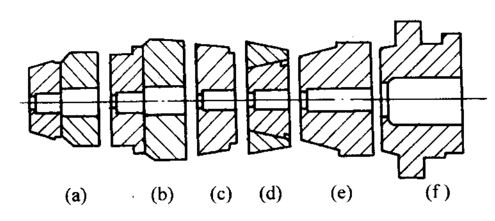


图 8.4-2　挤压模的外形结构

(a) 带倒锥体的锥形模；(b) 带凸台的圆柱形模；(c) 带正锥体的锥形模；(d) 带倒锥-中间压环锥形模；(e) 带倒锥体的柱-锥模；(f) 外形加强模

上述的分类方法是相对的，往往是一种模具同时具有上述分类中的几种特征。此外，一种模具形式又可根据具体的工艺特点、产品形状等因素细分成几个小类，如棒材模又可分为圆棒模、方棒模、六角棒模和异形棒模等，组合模又可分成如图 8.4-3 所示的多种模具类型。

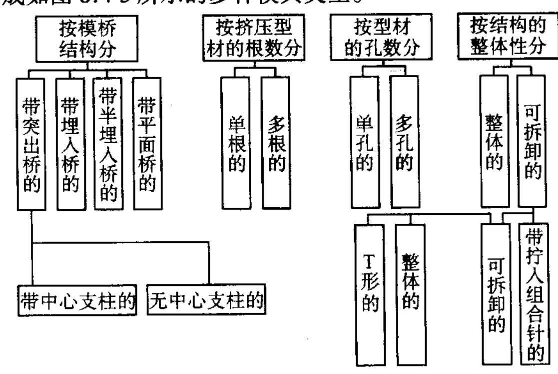


图 8.4-3　组合模的分类

2.2　型材挤压模具的组装方式

模具组件一般包括模子、模垫以及固定它们的模支承或模架（在挤压空心制品时，模具组件还包括针尖、针后端、芯头等）。根据挤压机的结构和模座型式（纵动式、横动式和滚动式等）的不同、模具的组装方式也不一样。

在带压型嘴的挤压机上，压型嘴与模支承用锁键连接（见图 8.4-4）。也有的利用中间锥形压环将模具安装在压型嘴内（见图 8.4-5）。这种结构的挤压机上，在模支承内或直接在压型嘴内固定模具，主要有三种方式：①将模具装配在带倒锥体的模支承内，锥体母线的倾斜角为 3°~10°（见图 8.4-6a）。这种固定方法能保证模子与模垫的牢固结合，增大模具端部的支承面，可简化模具装卸的工作量。模子和模垫用销子固定，并用制动销将模具固定在模支承上；②将模具装配在带环形槽的模支承内。当直径大于挤压筒工作内套内孔直径的模具宜用这种方法固定（见图 8.4-6b）；③将模具装配在带正锥体的模支承内（见图 8.4-6c），采用此种方法固定需制造专用工具，因此，只有在挤压大批量断面形状复杂的型材时才使用这种组装方式。

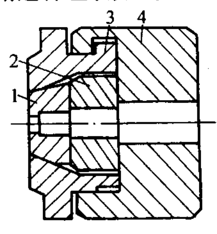


图 8.4-4　压型嘴与模支承用锁键连接的模具组装方式

1—模子；2—模垫；3—模支承；4—压型嘴

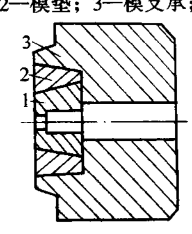
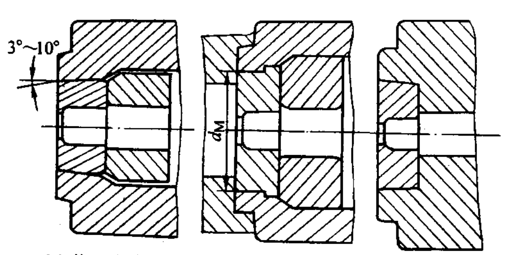


图 8.4-5　利用中间锥形压环将模具安装在压型嘴内的装配方式

1—模子；2—锥形压环；3—压型嘴

在不带压型嘴的挤压机上安装矩形或方形断面的压环，将模子和模垫装入压环内，再将压环安装在横向移动模架或旋转式模架内，利用 T 形锁键连接压环与模架（见图 8.4-7）。模具在模架中的固定方式见图 8.4-8 ~ 图 8.4-14。





(a) 装配在带倒锥体的模支承内；(b) 装配在圆柱形的模支承内；(c) 装配在带正锥体的模支承内

图 8.4-6　挤压模具组装图

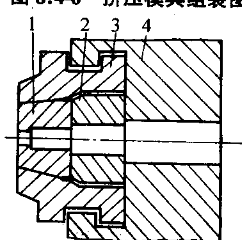


图 8.4-7　不带压型嘴挤压机上的模具组装方式

1—模子；2—模子垫；3—压环；4—模支承

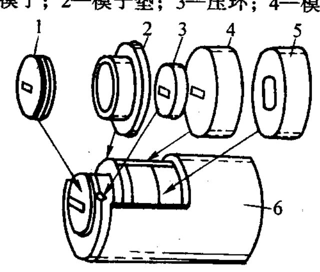


图 8.4-8　模具在模架中的组装方式

1—模子；2—模座；3—模垫；4—前支承环；5—后支承环；6—模架

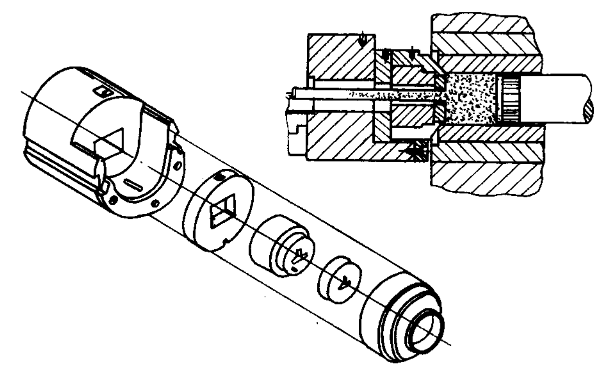


图 8.4-9　实心型材挤压模具装配图

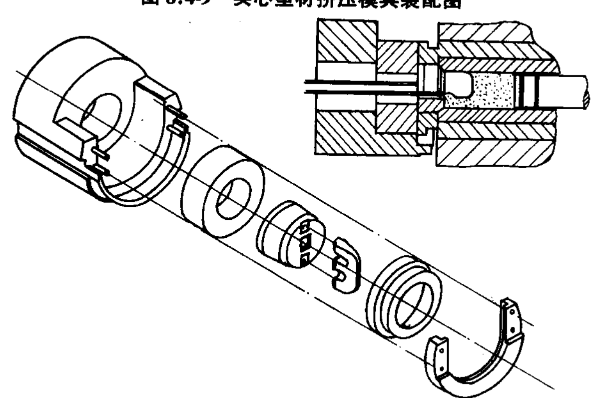


图 8.4-10　桥式挤压模具装配图

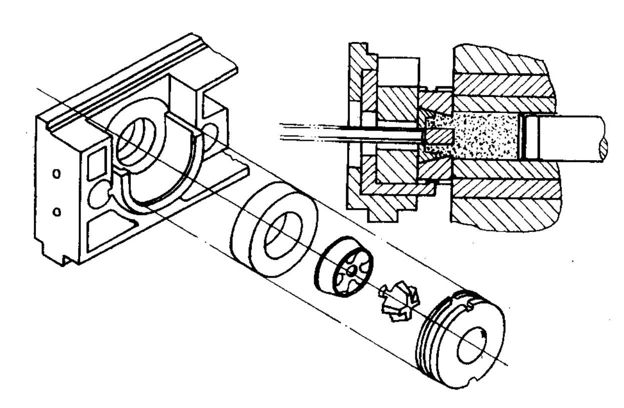


图 8.4-11　叉架式挤压模具装配图

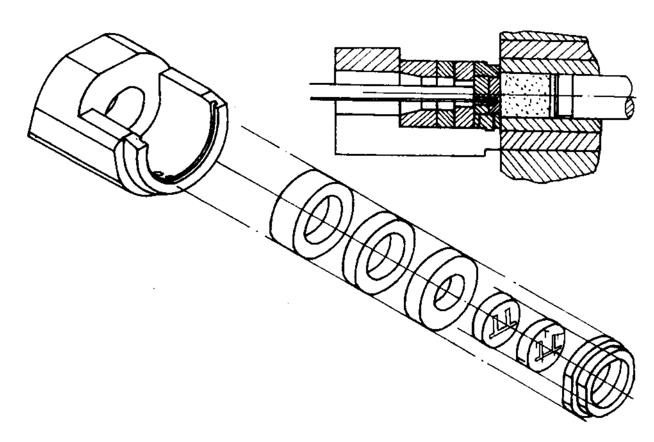


图 8.4-12　实心型材挤压模具装配图（在压型嘴模座中）

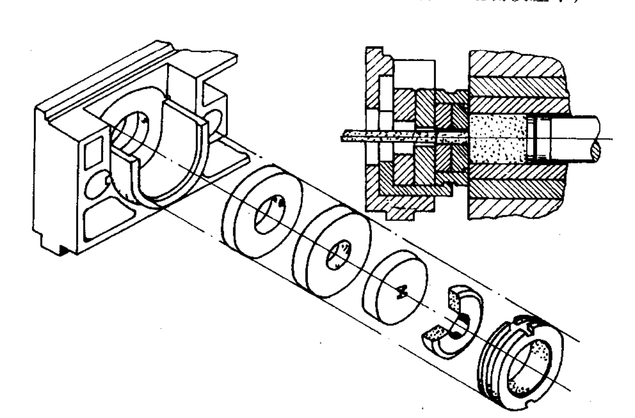


图 8.4-13　带导流板的模具装配示意图

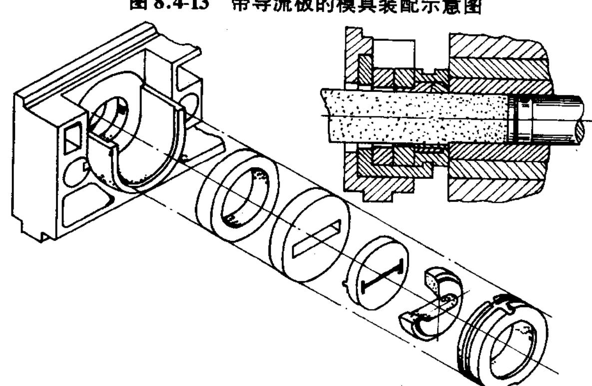


图 8.4-14　宽展挤压模具装配图

3　型材模具的典型结构参数及外形标准化

所谓模具的典型结构要素是指挤压模具的一般外形结构



和断面形状。下面以铝合金挤压中最基本和使用最广泛的平面模和锥形模为例，对模具设计中的典型结构要素，诸如模角 α，定径带长度 $h_定$，定径带直径 $d_定$，入口圆角 $r_入$，出口直径 $d_出$，外形尺寸等进行简略的分析。

3.1　挤压模结构参数的设计

1）模角 α　模角 α 是挤压模设计中的一个最基本的参数，它是指模子的轴线与其工作端面之间所构成的夹角，如图 8.4-15 所示。

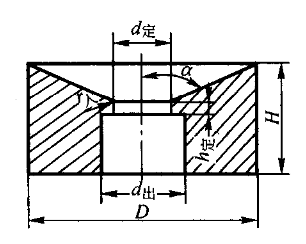


图 8.4-15　挤压模的结构参数设计图

模角 α 在挤压过程中起着十分重要的作用，其大小对挤压制品的表面质量与挤压力都有很大的影响。平模的模角 α 为 90°，其特点是在挤压时形成较大的死区，可阻止铸锭表面的杂质、缺陷、氧化皮等流到制品的表面上，可获得良好制品表面，但在挤压某些易于在死区产生断裂的金属与合金时，会引起制品表面上出现分层、起皮和小裂纹。采用平模挤压时，消耗的挤压力较大，模具容易产生变形，使模孔变小或者将模具压坏，特别是在挤压某些高温高强的难变形合金时，上述现象更为明显。从减少挤压力，提高模具使用寿命的角度来看，应使用锥形模。根据模角 α 与挤压力的关系，当 α = 45° ~ 60°时，挤压力出现最小值。但当 α = 45° ~ 50°时，由于死区变小，铸锭表面的杂质和脏物可能被挤出模孔而恶化制品的表面质量。因此，挤压铝合金用锥形模的模角应大于 50°，一般可取 55° ~ 65°。应该指出，随着挤压条件的改变，合理模角也会发生变化。如在静液挤压时，随着挤压系数的变化，模角可在 15°（小挤压系数）到 40°（大挤压系数）之间波动。静液挤压时模子的模角比正常挤压时要小的主要原因是工具与金属之间的摩擦力较小。不同工作介质的摩擦应力也不一样，因此其合理模角也会发生变化。

为了兼顾平面模和锥形模的优点，出现了平锥模和双锥模。（见图 8.4-1e）双锥模的模角为：α_1 = 60° ~ 65°；α_2 = 10° ~ 45°，但在挤压铝合金时，为了提高挤压速度，最好取 α_2 = 10° ~ 13°。

此外，还采用流线模、平流线模和碗形模等，这些模子的模角是连续变化的。

挤压铝合金型材用的模子和多孔模，多采用平面模，因其加工比较简单，锥模主要用来挤压铝合金管材。碗形模主要用于润滑挤压和无残料挤压。

2）定径带长度 $h_定$ 和直径 $d_定$。定径带又称工作带，是模子中垂直模子工作端面并用以保证挤压制品的形状、尺寸和表面质量的区段；定径带直径 $d_定$ 是模子设计中的一个重要基本参数。

设计 $d_定$ 大小的基本原则是：在保证挤压出的制品在冷却状态下不超出图纸规定的制品公差范围的条件下，尽量延长模具的使用寿命。影响制品尺寸的因素很多，如温度、模具材料和被挤压金属的材料，制品的形状和尺寸，拉伸矫直量以及模具变形情况等，在确定模具定径带直径时一般应根据具体情况着重考虑其中的一个或几个影响因素。关于 $d_定$ 的计算方法将在下文中分别叙述。

定径带长度 $h_定$ 也是模具设计中的重要基本参数之一。定径带长度 $h_定$ 过短，制品尺寸难于稳定，易产生波纹、椭圆度、压痕压伤等废品，同时，模子易磨损，会大大降低模具的使用寿命。定径带长度 $h_定$ 过长时，会增大与金属的摩擦作用，增大挤压力，易于黏结金属，使制品的表面出现划伤、毛刺、麻面、搓衣板型波浪等缺陷。

定径带长度 $h_定$ 应根据挤压机的结构形式（立式或卧式）、被挤压的金属材料、产品的形状和尺寸等因素来确定。在生产实际中，在立式挤压机上挤压管材时，一般取 $h_定$ = 2 ~ 6 mm；挤压铝合金时，一般取 $h_定$ 的最小值为 1.5 ~ 3 mm，最大值依产品的尺寸和形状确定。不同产品模具工作带长度 $h_定$ 的确定方法将在下文中分别叙述。

3）出口直径 $d_出$。模子的出口部分是保证制品能顺利通过模子并保证高表面质量的重要参数。若模子出口直径 $d_出$ 过小，则易划伤制品表面，甚至会引起堵模，但出口直径 $d_出$ 过大，则会大大削弱定径带的强度，引起定径带过早地变形、压塌，明显地降低模具的使用寿命。因此，在一般情况下，出口带尺寸应比定径带尺寸大 3 ~ 6 mm，对于薄壁管或变外径管材的模子此值可适当增大。为了增大模子的强度和延长模具的使用寿命，出口带可做成喇叭锥。出口喇叭锥角（从挤压型材离开定径带开始）可取 1°30′ ~ 10°（此值受锥形端铣刀角度的限制）。特别是对于壁厚小于 2 mm 而外形十分复杂的型材模子，为了保证模具的强度，必须做成喇叭出口。有时为了便于加工，也可设计成阶梯形的多级喇叭锥。

为了增大定径带的抗剪强度，定径带与出口带之间可以 20° ~ 45°的斜面或以圆角半径为 1.5 ~ 3 mm 的圆弧连接。

4）入口圆角 $r_入$。模子的入口圆角是指被挤压金属进入定径带的部分，即模子工作端面与定径带形成的端面角。制作入口圆角 $r_入$ 可防止低塑性合金在挤压时产生表面裂纹和减少金属在流入定径带时的非接触变形，同时也减少在高温下挤压时模子棱角的压塌变形。但是，圆角增大了接触摩擦面积，可能引起挤压力增高。

模子入口圆角 $r_入$ 值的选取与金属的强度、挤压温度和制品尺寸、模子结构等有关。挤压铝及其合金时，端面入口角应取锐角，但近来也有些厂家，在平面模入口处做成 $r_入$ = 0.2 ~ 0.75 mm 的入口圆角；在平面分流组合模的入口处做成 $r_入$ = 0.5 ~ 5 mm 的圆角。

5）其他结构要素。除了上述几个最基本的结构要素以外，铝合金挤压模具设计结构要素还包括有：阻碍角、止推角（或促流角）、阶段变断面型材模中的“料兜”、过渡区、组合模的凸脊结构、分流孔和焊合腔的形状、结构和尺寸以及穿孔针的锥度和过渡形式、模子的外廓形状与尺寸等，这些要素的确定原则将在下文中分别详细论述。

3.2　模具的外形尺寸及其标准化

此处主要论述常用棒材模、管材模以及实心断面型材模的外形结构、尺寸及其标准化。空心型材用模具和其他特殊结构和用途的模具将在后面的有关章节中专门讨论。

1）外形结构。根据挤压机的结构形式、吨位、模架结构、制品的种类和形状等不同，目前广泛采用的有以下几种不同外形结构的挤压模：

① 带倒锥体的锥形模。它与模垫一起安装在模支承内（见图 8.4-2a)。这种外形结构的模具获得了广泛的应用，在 7.5 ~ 20 MN 卧式挤压机上采用，挤压各种断面形状的型材，其优点是具有足够的强度，可节省模具材料。

② 带凸台圆柱形模具。它与模垫一起安装在模支承内（见图 8.4-2b)。这种结构的模具主要用于挤压横断面形状不



太复杂的型材。虽然在制造时消耗的钢材略有增加，但因在模子、模垫和压型嘴端面之间建立了可靠的支承，故其使用寿命可大大延长。

③ 带正锥体的锥形模具。它直接安装在压型嘴内而不需使用模垫（见图 8.4-2c）。这种结构的模具用来挤压横断面上带有突出部分的形状复杂的型材。为了增大支承面，需要制造专用的异形压型嘴。其主要缺点是模具在压型嘴内装配时，需要带有自锁锥体（约 4°的锥度），这会使得模孔的修理和挤压后由压型嘴内取出模子的操作变得复杂化。

④ 带倒锥体的锥形模具。它与中间锥形环一起安装在模支承内（见图 8.4-2d）。这种结构的模具主要用于挤压横断面积相当大的简单型材。因为不带模垫，模具直接安装在普通的非异形压型嘴内，大大增大了模子的弯曲和压缩应力，可能导致模子的损坏。这种结构的模具应用范围较窄。

⑤带倒锥的圆柱-锥形模具。模子与模垫做成一个整体（见图 8.4-2e）。这种结构的模具主要用来挤压断面带有悬臂部分（悬臂的高宽比由 3:1 到 6:1）的型材。由于悬臂较长，型材断面的外接圆不应超过挤压筒直径的 0.6 倍，在 7.5～20 MN 卧式挤压机上。这种结构的模子与专用的异形压型嘴配套使用。在 50～200 MN 挤压机上则与专用异形垫环或专用的异形压型嘴配套使用。

⑥按模支承的外形尺寸制造的加强式整体模具（见图 8.4-2f）。这种结构的模具主要用来挤压带有长悬臂部分的型材。它与专用异形压型嘴或专用垫、环配合使用。因为加工复杂，成本较高，所以这种结构的模具只有在特殊需要的情况下才使用。

2）外形尺寸的确定原则。模具的外形尺寸是指模子的外圆直径 $D_{模}$ 和厚度 $H_{模}$ 以及外形锥角。模具外形尺寸主要由模具的强度来确定，同时，还应考虑系列化和标准化，以便管理和使用。具体来说，应根据挤压机的结构形式和吨位、挤压筒的直径、型材在模子工作平面上的布置、模孔外接圆的直径、型材断面上是否有影响模具和整套工具强度的因素等来选择模具外形尺寸。

为了保证模具所必需的强度，推荐用以下的公式来确定模具的外圆直径：

当挤压筒直径小于 200 mm 时，$D_{模} \geq 0.6D_0$（式中 D_0 为经过模孔最远点所划的外接圆直径）。为了简化起见，可以直接取 $D_{模} \approx (0.8 \sim 1) D_{筒}$。

模具的厚度 $H_{模}$ 取决于制品的形状、尺寸和挤压机的吨位、挤压筒的直径以及模具和模架的结构等。在保证模具组件（模子＋模垫＋垫环）有足够的强度的条件下，模具的厚度 $H_{模}$ 应尽量薄一些，规格应尽量少，以便于管理和使用。一般对于中、小型挤压机，取 $H_{模} = 25 \sim 80$ mm，对于 80 MN 以上大型挤压机，取 $H_{模} = 80 \sim 150$mm。

模具的外形锥度有正锥和倒锥两种，带正锥的模具一般取 1°30′～4°的锥度；带倒锥的模具一般取 6°～10°。为了便于加工外圆锥度，在锥体尾部一般加工出 10 mm 左右的止口部分。

4 型材挤压模具的设计方法及技术要求

4.1 模具设计方法

在充分考虑了影响模具设计的各种因素之后，应根据产品的类型、工艺方法、设备与模具结构来设计模腔形状和尺寸，但是，在任何情况下，模腔的设计均应遵守如下的原则与步骤。

1）确定设计模腔参数。设计正确的挤压型材图，拟订合理的挤压工艺，选择适当的挤压筒尺寸，挤压系数和挤压力，决定模孔数。这一步是设计挤压模具的先决条件，可由挤压工艺人员和设计人员根据生产现场的设备条件、工艺规程和大型基本工具的配备情况共同研究决定。

2）模孔在模子平面上的合理布置。所谓合理布置就是将单个或多个模孔，合理地分布在模子平面上，使之在保证模子强度的前提下获得最佳金属流动均匀性。单孔的棒材、管材和对称良好的型材模，均应将模孔的理论重心置于模子中心上，各部分壁厚相差悬殊和对称性很差的产品，应尽量保证模子平面 x 轴和 y 轴的上下左右的金属量大致相等，但也应考虑金属在挤压筒中流动特点，使薄壁部分或难成形处尽可能接近中心，多孔模的布置主要应考虑模孔的数目、模子强度（孔间距及模孔与模子边缘的距离等），制品的表面质量、金属流动的均匀性等问题。一般来说，多孔模应尽量布置在同心圆周上，尽量增大布置的对称性（相对于挤压筒的 x 轴和 y 轴），在保证模子强度的条件下（孔间距应大于 30～50 mm，模孔距模子边缘应大于 25～50 mm），模孔间应尽量紧凑和尽量靠近挤压筒中心（离挤压筒边缘应大于20～40 mm）。图 8.4-16 列出了三孔型材模孔型腔配置的三种形式：三字型、交错型和星星型。试验研究表明，星星形布置能获得最均匀的金属流动，因为三个模孔均匀地布置在挤压筒的三个相等的扇形块内，在挤压时间三个模孔中供应的金属量以及三个模孔中应变应力状态和金属流动速度基本上是相同的。

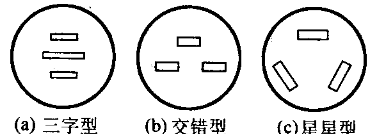


图 8.4-16 三孔型材模的基本布置形式

3）模孔尺寸的合理计算。计算模孔尺寸时，主要考虑被挤压合金的化学成分，产品的形状、公称尺寸及其允许公差，挤压温度及在此温度下模具材料与被挤压合金的线膨胀系数，产品断面上的几何形状的特点及其在挤压和拉伸矫直时的变化，挤压力的大小及模具的弹塑性变形情况等因素。对于型材来说，一般用以下公式计算模孔尺寸：

$$A = A_0 + M + (K_y + K_p + K_T)A_0 \qquad (8.4\text{-}1)$$

式中，A_0 为型材断面的公称尺寸；M 为型材公称尺寸的允许偏差；K_y 为对于边缘较长的丁字形、槽形等型材来说，考虑由于拉力作用而使型材部分尺寸减少的系数；K_p 为考虑到拉伸矫直时尺寸缩减的系数；K_T 为型材的热收缩量；

$$K_T = t\alpha - t_1\alpha_1 \qquad (8.4\text{-}2)$$

式中，t、t_1 为分别为坯料和模具的加热温度；α、α_1 为分别为挤压温度下被挤压型材和模具材料的线膨胀系数。

对于壁厚差很大的型材，其难于成形的薄壁部分及边缘的尖角区应适当加大尺寸，对于宽厚比大的扁宽薄壁型材及壁板型材的模孔，桁条部分的尺寸可按一般型材设计，而腹板厚度的尺寸，除考虑式 8.4-1 所列的因素外，尚需考虑模具的弹性变形与塑性变形及整体弯曲，距离挤压筒中心远近等因素。此外，挤压速度，有无牵引装置等对模孔尺寸也有一定的影响。

4）合理调整金属的流动速度。所谓合理调整金属的流动速度就是在理想状态下，保证制品断面上的每一个质点应以相同的速度流出模孔。合理调整金属流速的方法主要在模



子平面上合理布置模孔，尽量采用多孔对称排列，根据型材的形状，各部分壁厚的差异和比周长的不同以及距离挤压筒中心的远近，设计不等长的定径带。一般来说，型材某处的壁厚越薄，比周长越大，形状越复杂，离挤压筒中心越远，则此处的定径带应越短，当用定径带仍难于控制流速时，对于形状特别复杂，壁厚很薄，离中心很远的部分可采用促流角或采用导料锥来加速金属的流动。相反，对于那些壁厚大得多的部分或离挤压筒很近的地方就应采用阻碍角进行补充阻碍，以减缓此处的流速。此处，还可以采用工艺平衡孔，工艺余量或者采用前室模、导流模，改变分流孔的数目、大小、形状和位置来调节金属的流速。

5）保证足够的模具强度。由于挤压时模具的工作条件是十分恶劣的，所以模具强度是模具设计中的一个非常重要的问题。除了合理布置模孔的位置，选择合适的模具材料，设计合理的模具结构和外形之外，精确地计算挤压力和校核各危险断面的许用强度也是十分重要的。目前计算挤压力的公式很多，但经过修正的 И.Л. 别尔林公式仍有工程价值，挤压力的上限解法，也有较好的适用价值。至于模具强度的校核，应根据产品的类型、模具结构等分别进行。一般平面模只需要校核剪切强度和抗弯强度。舌型模和平面分流模则需要校核抗剪、抗弯和抗压强度，舌头和针尖部分还需要考虑抗拉强度等。强度校核时的一个重要的基础问题是选择合适的强度理论公式和比较精确的许用应力。

4.2 模具设计的技术要求

模具结构、形状和尺寸设计计算完毕之后，要对模具的加工质量、使用条件提出基本要求，这些要求主要是：

1）有适中而均匀的硬度，模具经淬火、回火处理后，其硬度值为 40～52HRC（根据模具的尺寸而定，尺寸越大，要求的硬度越低）。

2）有足够高的制造精度，模具的形位公差和尺寸公差应符合图纸的要求（一般按负公差制造），配合尺寸具有良好的互换性。

3）有足够高的表面粗糙度，配合表面应达 $R_a = 3.2 \sim 1.6\ \mu m$，工作带表面达 $R_a = 1.6 \sim 0.4\ \mu m$，表面应进行氮化处理、磷化处理或其他表面强化处理，如多元素共渗处理及化学热处理等。

4）有良好的对中性、平行度、直线度和垂直度，配合面的接触率应大于 80%。

5）模具无内部缺陷和表面缺陷，一般应进行超声波探伤和表面质量检查后才能使用。

6）工作带变化处及模腔分流孔过渡区、焊合腔中的拐接处应圆滑均匀过渡，不得出现棱角。

5 模具结构设计

5.1 实心型材挤压模具设计

实心型材主要用单孔或多孔的平面模来进行挤压。在挤压断面形状比较复杂，非对称性很强或型材各处的壁厚尺寸差别很大的型材时，往往由于金属流出模孔时的速度不均匀而造成型材的扭拧、波浪、弯曲及裂纹等废品，因此，为了提高挤压制品的质量，在设计型材模具时，除了要选择有足够强度的模具结构以外，还需要考虑模孔的配置，模孔制造尺寸的确定和选择保证型材断面各个部位的流动速度均匀的设计。

5.1.1 模孔的合理配置

（1）单孔模的模孔配置

型材的横断面形状和尺寸是合理配置模孔的重要因素之一。根据对于坐标轴的对称程度可将型材分成三类：即横断面对称于两个坐标轴的型材，此种型材对称性最好；断面对称于一个坐标轴的型材，此种型材的对称性次之；横断面不对称的型材，此种型材对称性差。

在设计单孔模时，对于横断面和两个坐标轴相对称（或近似对称）的型材，其合理的模孔配置是应使型材断面的重心和模子的中心相重合（图 8.4-17）。

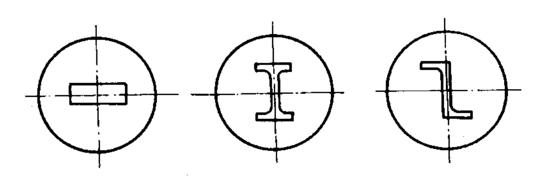


图 8.4-17 轴对称型材模孔的布置

在挤压横断面尺寸对于一个坐标轴相对称的型材时，如果其缘板的厚度相等或彼此相差不大时，那么模孔的配置应使型材的对称轴通过模子的一个坐标轴，而使型材断面的重心位于另一个坐标轴上（图 8.4-18）。

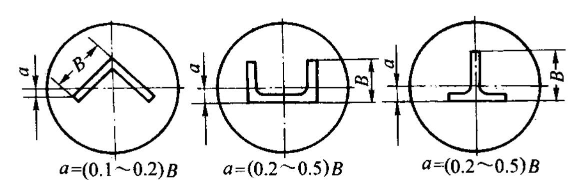


图 8.4-18 对称于一个坐标轴而缘板厚度比不大的型材模模孔的布置

对于非对称性的型材和壁厚差别很大的型材，若采用上述原则配置模孔，将使型材断面的重心到模子中心的距离增大，而把模孔位置移到模子的边缘上。同时，很难保证型材各个部位的流动速度均匀，还要制造通道移位的专用工艺装备（模垫、压型嘴、导向装置等）。因此对于各部分壁厚不等的型材和不对称型材，必须将型材的重心相对于模子的中心作一定距离的移动，应尽可能地使难于流动的壁厚较薄的部位靠近模子中心，尽量使金属在变形时的单位静压力相等（图 8.4-19）。

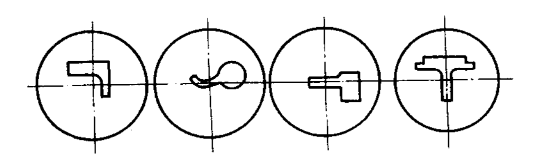


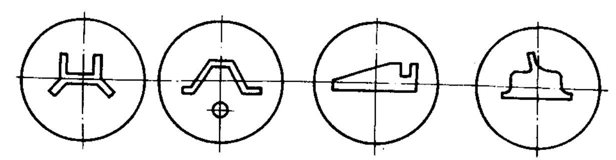
图 8.4-19 不对称和缘板厚度比大的型材模孔的布置

对于缘板厚度比虽然不大、但截面形状十分复杂的型材应将型材截面外接圆的中心布置在模子中心线上（图 8.4-20a），对于挤压系数很大，挤压有困难或流动很不均匀的某些型材可采用平衡模孔（在适当位置增加一个辅助模孔的方法（图 8.4-20b）或增加工艺余料的方法（图 8.4-20c）或采取合理调整金属流速的其他措施（下面将要讨论）来改善挤压条件，保证薄壁缘板部分的拉力最小，改善金属流动的均匀性，以减少型材横向和纵向几何形状产生弯曲、扭曲、波浪及撕裂等现象。为了防止型材由于自重而产生扭拧和弯曲，应将型材大面朝下，增加型材的稳定性（图 8.4-20d）。

总之，单孔型材模孔的布置，应尽量保证型材各部分金属流动均匀，在 x 轴上下方和 y 轴左右方的金属供给量应尽可能相近，以改善挤压条件，提高产品的质量，同时，也应考虑模具的强度和寿命，尽可能使用通用模具。

（2）多孔模模孔数目的确定





(a) 对称型材　(b) 增加工艺孔　(c) 增加工艺余料　(d) 增加型材稳定性

图 8.4-20　复杂不对称单孔型材模孔的配置

采用多孔模挤压实心型材的目的是为了提高挤压机的生产率和成品率，降低挤压系数和减少挤压力，减短挤出长度以适应挤压机工作台的结构等，在生产非对称的复杂型材时，为了均衡金属的流速，有时也采用多孔模挤压。

多孔型材模模孔数目的选择原则与多孔棒模的选择基本相同，主要应考虑挤压系数 λ 的影响，保证模子强度，金属流动的均匀性和制品的表面质量，与多孔棒模相比，在选择多孔型材模模孔数目时应注意：

1）应保证有足够大挤压系数。为了保证制品的力学性能，挤压型材时的挤压系数应大于 12。挤压系数的最大值，应根据挤压筒的比压、合金性质、挤压的难易程度等因素来决定，对于难挤合金，一般说 λ 不应大于 50，对于易挤压金属或合金，λ 可大于 100 以上，特别是对于软铝系民用建筑型材来说，根据型材的形状和尺寸，λ 可大至 200 以上，由于型材的壁厚一般比较薄，容易中断，因此其挤出长度可不受挤压机工作台长度的限制，所以也允许采用较大的挤压系数，挤出较长的型材。

2）型材的形状比棒材复杂得多，而且壁厚较薄且不均匀，所以金属流动的均匀性比棒材差得多，很容易产生挤出长度不齐、波浪、扭曲等缺陷，所以模孔不宜过多，否则可能缠绕在一起，大大影响制品的表面质量，甚至引起堵模。对于铝合金型材来说，一般取 2，3，4，6 个模孔。在特殊情况下，或采取了特殊的工艺措施之后也可多至 12 个孔。多孔模挤压时，应配置牵引装置或专用导路。

3）型材的形状较复杂，模孔的尖角部分容易引起应力集中，因此在选择模孔数目时要注意模子强度，避免模孔间距和模孔与模子边缘的间距过小。

（3）多孔模的模孔布置

挤压两孔或多孔型材时，模孔的布置必须遵守中心对称原则，而可以不遵守轴对称原则，如图 8.4-21 所示。

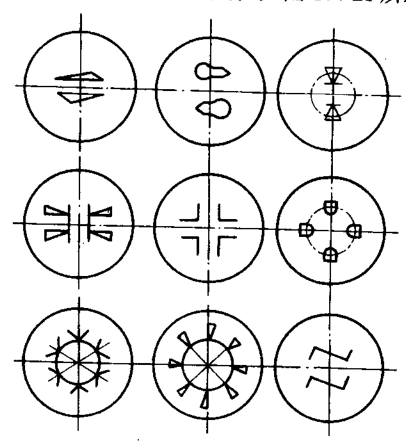
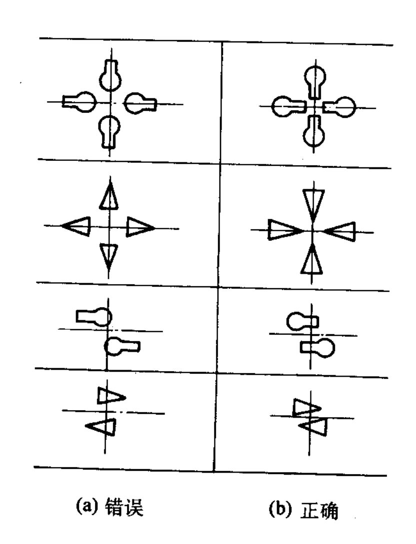
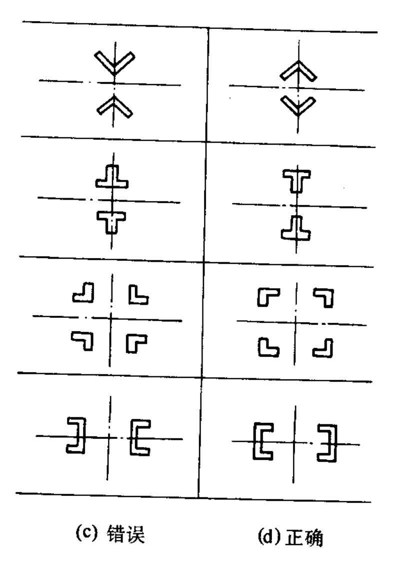


图 8.4-21　多孔模模孔的合理配置系统图

在配置模孔时，应考虑到模孔离挤压筒中心的距离不同，金属流动速度有差异的现象，因此型材断面上薄壁部分应向着模子的中心，而壁厚部分应向着模子的边缘，见图 8.4-22，这种配置，还可提高模孔之间的连接部分的强度。





(a) 错误　(b) 正确　(c) 错误　(d) 正确

图 8.4-22　多孔型材模的配置方案

a）、c）错误　b）、d）正确

对于对称性较好，且断面上各处的壁厚相差不大的型材，可将型材模孔的重心均布在以模子中心为圆心的圆周上。

为了保证模子的强度，多孔型材模孔之间应保持一定的距离，在实际生产中对于 8 000 t 以上的大型挤压机取 60 mm 以上，对于 5 000 t 挤压机取 35 ~ 50 mm，而对于 2 000 t 以下的挤压机可取 20 ~ 30 mm。

为了保证制品的质量，配置多孔模模孔时还必须考虑模孔边缘与挤压筒壁之间的距离，当这个距离太小时，制品边缘会出现成层等缺陷，表 8.4-3 列出了模孔与挤压筒壁间的最小允许距离。

表 8.4-3　模孔与挤压筒壁间的最小距离

挤压筒直径/mm	85 ~ 95	115 ~ 130	150 ~ 200	200 ~ 280	300 ~ 500	> 500
模孔边缘与挤压筒壁间最小间距/mm	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 25	30 ~ 40	40 ~ 50	50 ~ 60

照例，模孔间距和模孔边缘与挤压筒壁之间的距离也应系列化，以利于模垫、前环等大型基本工具及导路等有互换性和通用性。

根据具体的挤压条件，对型材的形状和尺寸，挤压筒和模具的规格，产品的要求，模子的强度以及需要采用工具的情况等进行了详细分析，并确定出矛盾的主要方面之后，可以采用不同的形式对多孔模进行排列，如图 8.4-16 中示出的三孔带板模的排列形式。图 8.4-23 示出的四孔角形模的排列形式。

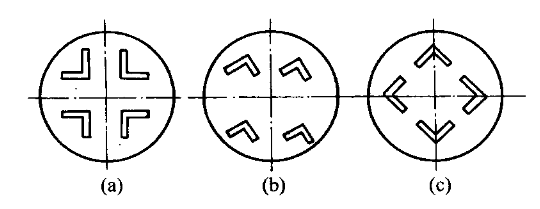


图 8.4-23　四孔角形型材模孔的排列方式
(a) 产品的组织性能均匀，但易产生扭拧，需要装导路；
(b) 挤出的产品较平整，但支承环的导出孔太大；
(c) 克服 a、b 的缺点，但模子强度大大削减

5.1.2　型材模孔形状与加工尺寸的设计

如前所述型材模孔尺寸主要与被挤压合金型材的形状、尺寸及其横断面尺寸公差等因素有关，此外还必须考虑型材断面的各个部位几何形状的特点及其在挤压和拉伸矫直过程中的变化。在生产中一般按式（8.4-1），即

$$A = A_0 + M + (K_y + K_p + K_T)A_0$$

来进行计算。对于铝及其合金来说，上式中的系数 K_y 和 K_p 可按表 8.4-4 选取。

公式中的其他参数如公差、线膨胀系数等可在有关的手册或标准中查取。

为了说明式（8.4-1）的使用方法，以图 8.4-24 中所示型材为例进行尺寸的计算。型材材料为 2A12 合金，模具材料为 3Cr2W8V。

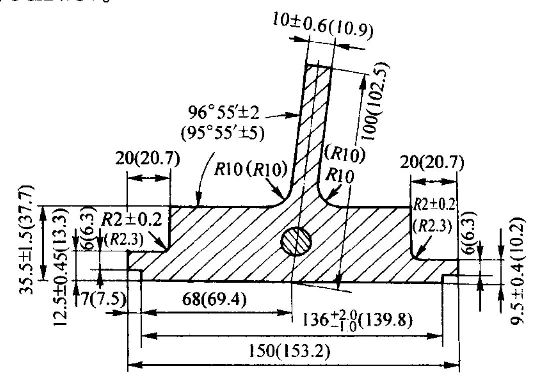


图 8.4-24　计算型材图（括号外尺寸为型材名义尺寸，括号内尺寸为模孔设计尺寸）

先确定系数 K_T

对于 2A12 合金，$\alpha = 25 \times 10^{-6}$℃$^{-1}$，$t = 450$℃

对于 3Cr2W8V 钢，$\alpha_1 = 14 \times 10^{-6}$℃$^{-1}$，$t_1 = 400$℃

故 $K_T = (t\alpha - t_1\alpha_1) = 450 \times 25 \times 10^{-6} - 400 \times 14 \times 10^{-6} = 0.005\,6$

取 $K_T = 0.006$

系数 K_y 和 K_p 可按型材断面尺寸从表 8.4-4 中查取，然后按式（8.4-1）计算模孔的加工尺寸。

表 8.4-4　公式 8.4-1 中的系数 K_y、K_p 值

型材断面尺寸/mm	K_y	K_p	型材断面尺寸/mm	K_y	K_p
1 ~ 3	0.04 ~ 0.03	0.03 ~ 0.02	61 ~ 80	0.004 ~ 0.005	0.006 ~ 0.007
4 ~ 20	0.02 ~ 0.01	0.02 ~ 0.01	81 ~ 120	0.003 ~ 0.004	0.005 ~ 0.006
21 ~ 40	0.006 ~ 0.007	0.007 ~ 0.008	121 ~ 200	0.002 ~ 0.003	0.003 5 ~ 0.004 5
41 ~ 60	0.005 ~ 0.006	0.006 5 ~ 0.007 5	> 200	0.001 ~ 0.001 5	0.002 ~ 0.003

5.2　空心型材挤压模具设计

5.2.1　空心型材挤压模的工作特点

空心型材挤压模是安装在挤压机上生产各种管材和空心型材的一种主要模具，根据其形状特点，也称舌型模。其特点是将针放在模孔中，与模孔组合成一个整体，针在模子中犹如舌头一样，如图 8.4-25 所示。舌型模由支承柱 1；模桥（分流器）2；组合针（舌头）3；模子内套 4；模子外套 5 等组成。1、2、3 部分制成一个整体，模子用热配合组装在一起，这样，就组成了一个完整的舌型模。为了保证模子与模子套很好配合并保证模子强度，在实际生产中还需做一个模子垫，以支持模子不被退出模子套外。

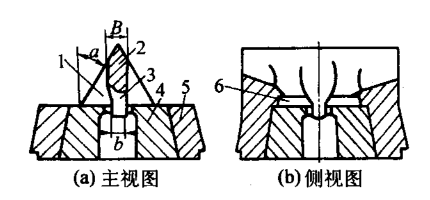


图 8.4-25　桥式舌型模结构图
1—支承柱；2—模桥（分流器）；3—组合针（舌头）；
4—模子内套；5—模子外套；6—焊合室

空心型材挤压模挤压的工作原理是，实心铸锭在强大的挤压力作用下，被模子上的桥部分成几股金属流，流入焊合室，在高温高压高真空的条件下重新焊合并经模孔与针形成的间隙中流出而形成所需要形状和尺寸的空心制品，制品的焊缝数与金属流的股数相同。

（1）用舌型模挤压空心制品的优点

舌型模挤压空心制品的优点如下：

1）用舌型模生产管材与用穿孔针法生产管材相比，外形尺寸更精确，壁厚更均匀。当管材内径在 $\phi30$ 以下时，其公差可控制在 ±0.15 mm 以内，壁厚在 3 mm 以内时，壁厚差不超过 0.2 mm，这种精度范围用穿孔针生产是很难达到的。此外，用穿孔针生产管材时，其每根管子内径尺寸和壁厚差大都不相同，而且变化很大，但用舌型模生产的管材，尺寸都很稳定。

2）管材的内外表面质量良好，不会产生起皮，分层和气泡之类的缺陷。表面粗糙度可达 $R_a = 0.8 \sim 0.4\ \mu m$，而用穿孔针生产的管材内表面只能达到 $R_a = 1.25\ \mu m$，而且往往会出现较严重的擦伤、划伤成废品。

3）可生产内径较小的管材和空心型材，最小内径可达 2.5 mm，而用穿孔针根本无法生产这样小内径的管材，如 600 t 挤压机上最小内孔直径为 $\phi16$，当挤压内孔小于 $\phi16$ 时，穿孔针就很可能产生弯曲或者被拉断。



4）可生产断面形状极为复杂的异形材和空心型材，如双壁管，变断面管材和内孔小到 $\phi0.625$ 的型材，如图 8.4-26 和图 8.4-27 所示，而采用穿孔针法是根本无法生产的。

5）可在无独立穿孔系统的型、棒挤压机上用实心铸锭生产管材和空心型材，这种方法简化了工艺，提高了材料利用系数。

6）在挤压时，由于舌型模的桥部对铸锭的中心部分的金属起阻碍作用，金属流动较为均匀，故可减少缩尾等缺陷。

7）与平面组合模相比，用舌型模挤压时挤压力较低（低 12%左右），金属流动较容易，更适应于生产挤压性能较差的合金（如 2A12、7A04 等）的管材和空心型材。

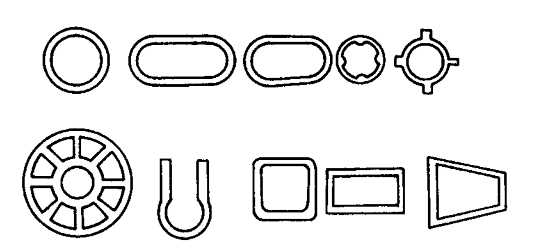


图 8.4-26　舌型模挤压的异形管材

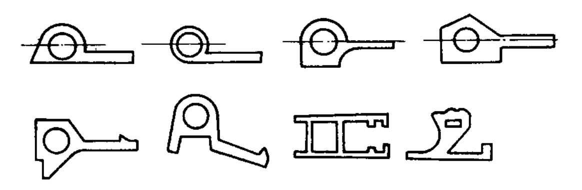


图 8.4-27　用舌型模挤压的部分异形空心型材

（2）空心型材挤压模挤压存在的一些缺点

空心型材挤压模挤压存在的缺点如下：

1）制品有焊缝，当工艺条件不当时，焊缝的强度低于基本金属的强度（仅 70%～80%左右），有时甚至导致制品焊合不良，出现裂纹、分层、气泡和粗晶等缺陷。

2）与穿孔针挤压相比挤压力较高（高 20%左右），模子易于损坏。模子的设计和制造较为复杂，成本较高。

3）用舌型模挤压时，一般用拉断法使制品与残料分离，所以残料较长，一般为桥高的 1.5～2 倍或等于（0.9～1.1）$D_{筒}$，比穿孔针挤压时的残料长 2～3 倍。从而降低了产品的成品率。

4）与平面模相比，舌型模挤压时，修模和清理都很困难。

5）模桥和支承柱的强度不如平面组合模，在挤压时必须仔细地调整挤压的中心，特别是要很好地使挤压筒与工具部件对准中心。

5.2.2　舌型模的结构类型

按桥的结构不同，舌型模主要可以分为如图 8.4-28 所示的各种类型。

带突出桥的模子（图 8.4-28a）加工比较简单，所需挤压力较小，型材各部分的金属流动速度较均匀，可以采用较高的挤压速度。用这种形式的模子可挤压一根型材，也可以同时挤压几根型材，带突出桥的模子，其主要缺点是挤压残料较长，模桥和支承柱的强度不如其他结构的模子，需要仔细调整工具部件与挤压筒的中心。

带埋入桥的模子（图 8.4-28c），其主要优点是强度很高，但存在许多缺点，诸如不能挤压外接圆直径较大的型材，需要较大的挤压力，挤压难变形的硬合金制品时，挤压系数和铸锭长度受到限制，只能用剪刀切割残料，残料留在

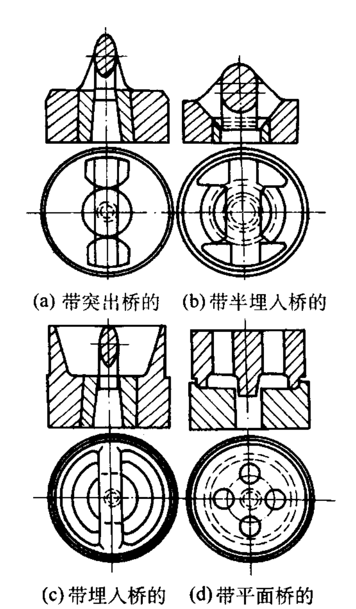


图 8.4-28　舌型模的结构形式

模具的锥形漏斗和模腔内，会影响下一根型材的表面质量和焊缝质量，模具加工困难等等，因此限制了它的使用范围。

带半埋入桥的模子介于上述两种模子之间，其主要优点是强度很高，残料较小，在挤压最难变形的合金 5A06 等的型材时，往往采用这种形式的模子。

按产品形状不同，舌形模可分为管材舌型模，波导管舌型模和异形空心型材舌型模。

管材舌型模的特点是在小模子入口处做成 25°的流动角。

生产矩形管（波导管）的舌型模的特点是在模子套入口处做成 45°的流动角，为了保证模子桥的强度，使小模子平面低于模子套平面，这就减短了桥的高度，增加了桥根高度。

生产异形空心型材的舌型模，其特点是小模子与模子套的高度相等，舌头的直径比管材舌型模的舌头直径小。

按结构的整体性不同，舌型模可分为带 T 形桥的，带整体桥的和带拧入式组合针的三种。

整体式舌型模的设计、加工和装配都比较容易，但当舌头损坏时，很难修理，往往会造成整套模具报废。而可拆卸式舌型模修理比较方便，特别是挤压多孔型材时，当一个小舌头损坏时，只需更换一个损坏的舌头，而不需要更换整个模子，在挤压具有小孔的折叶型材和多孔型材时，带拧入式的组合针的舌型模应用得特别广泛。

5.2.3　舌型模模孔的合理配置

铝合金空心型材的主要特点是横断面的几何形状复杂，且各部分的厚度差较大，用舌型模进行挤压时金属被模桥分成几股，而在多数情况下金属又不可能被分成相等的体积。另外在挤压过程中，金属沿舌头长度会产生附加摩擦力；沿着模桥的侧表面会产生不均匀的摩擦力；在被分开的金属体积中会产生温度差。所有这些都会促使金属从模孔中流出时的流速不均，被挤压型材的几何形状产生附加弯曲。因此，在设计横断面不对称的空心型材的舌型模时，应合理地配置模孔与模桥中心的位置，一般情况下，应使被分开的金属断面积与模孔断面积成正比。

对于像折叶类等横断面十分复杂且壁厚变化很大的型材来说，要满足上述的配置原则是不可能的。图 8.4-29 为挤压缘板宽度为 70 mm 的带圆头的空心型材舌型模（用 $\phi130$ mm 挤压筒进行挤压），为了均衡金属，模桥的位置稍微偏离模具中心，模桥偏离过大时，将使焊合室的容积显著减

少，金属难以充满焊合室。为了补救，在模桥上做成切口2，同时采用不同的工作带宽度来调节金属流出模孔时的不均匀性。有时，为了提高金属流动的均匀性，组合针要偏移模桥中心，如图 8.4-30a 所示。当挤压横断面尺寸大的空心型材时，模桥最好与垂直轴线不对称，如图 8.4-30b 所示。当模桥高度与宽度尺寸选择合理时，则金属从被分开的瞬间到开始流入模孔时的摩擦表面和路程将显著减少。

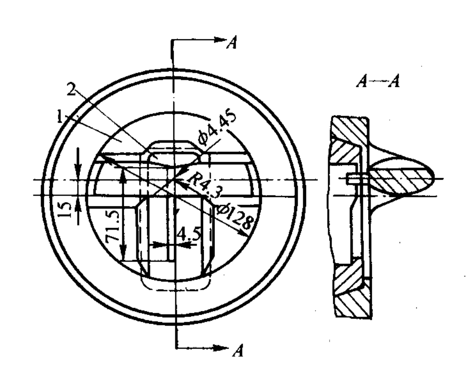


图 8.4-29　折叶式型材舌型模模桥偏离模具中心线
1—焊合室；2—切口

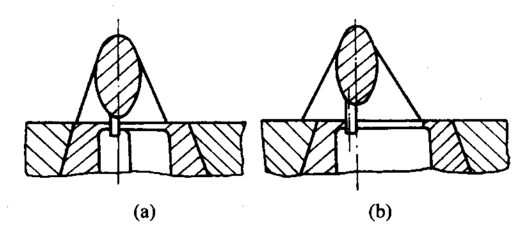


图 8.4-30　组合针相对对称断面模桥（a）和不对称断面模桥（b）偏心配置的舌型模

由此可见，为了合理配置舌型模的模孔与舌头的位置，不仅要考虑型材的形状、壁厚的差异，而且要考虑舌头与模桥的形状和尺寸，以及分流孔的形状和尺寸。因此，舌型模的模孔配置要比平面模复杂得多。

5.2.4　舌型模结构要素的设计特点

舌型模的设计结构要素比较复杂，为了简便起见，仅以图 8.4-31 为例，对其主要要素进行分析。

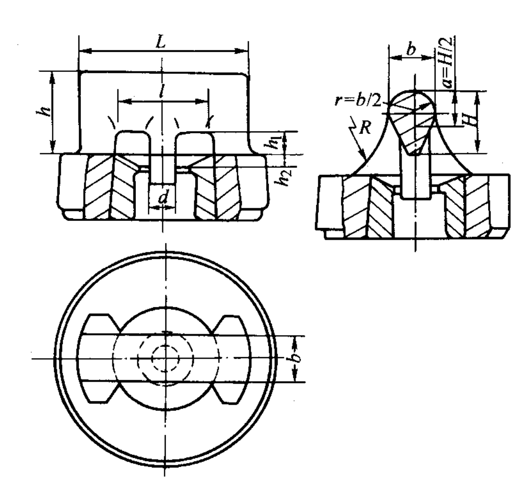


图 8.4-31　舌型模的结构要素分析图

（1）模桥的断面形状

模桥的断面形状根据舌型模的结构和产品形状而定，一般常采用梭子形、棱形和水滴形三种，如图 8.4-32 所示。

梭子形舌型模模桥的优点是在挤压过程中残料容易分离，抗剪强度较高。

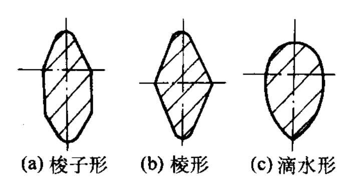


图 8.4-32　舌型模桥的断面形状

棱形模桥的优点是桥高可降低，但分离残料后模凹处的焊合室中的金属保留得过多，会影响产品质量。

水滴形舌型模模桥是一种最理想的模桥形式，其优点是易于分离残料，产品质量良好，模桥的强度高，因此应用得比较广泛。为了获得良好的水滴形，H 和 b 应保持一定的比例关系，对于空心型材来说，H/b 在 1.5～2.0 之间为最佳。

桥根部的圆弧 R 对桥根的强度影响很大，因此，应选择适当，一般来说，$R = H - r$ 较为合适。

（2）桥高 h

桥高 h 决定挤压残料的高度，一般取残料高度等于（1.5～2）h，因此若 h 过大，使残料增加，直接影响成品率，分离残料也比较困难，所以 h 应尽可能取下限。但当 h 取得过小时，在高压下模桥易弯曲，甚至被剪断。根据生产实践证明，内径为 ϕ20～ϕ70 mm 的管材舌型模，模桥高度可由下式求得：

$$h = (1.5 \sim 2)d \qquad (8.4\text{-}3)$$

式中，h 为模桥的高度；d 为舌头直径（相当于管材内径）。

1.5～2 为系数，对于内径较大的管材取下限。用于挤压空心型材（如铰链型材）的舌型模，模桥高度 h 可取 40～50 mm，对于形状比较复杂的空心型材来说，舌型模模桥高度应根据不同情况而定。

桥孔高度 h_2 和 h_1 直接影响模桥的强度，空心型材的焊缝质量和成品率。h_2 愈大时，则焊缝质量愈好，但当桥高 h 一定的情况下，会相对地削弱模桥的强度，若 h 也相应增大，又会影响产品的成品率，因此，可将 h_1 设计成负值或 0，即将焊合室从模子外边移到模子里面，采用半埋入式或埋入式舌型模。

（3）模桥宽度 L

模桥宽度 L 根据已选定的挤压筒内径来确定，L 应比挤压筒内径稍小一点，以便于在筒内自由地往复运动，一般取：

$$L = D_0 - (2 \sim 3)\text{mm}$$

式中，L 为桥宽，mm；D_0 为挤压筒内径，mm。

在确保模桥根部有足够强度，不致因分离残料时模桥被拉断的情况下，模桥的宽度 L 应尽量取大一些，这对焊缝质量和空心型材的尺寸精度都有好处。

（4）模桥厚度 b

模桥厚度 b 对模桥的强度和产品焊合质量有一定的影响，对于管材内径为 ϕ20～70 mm 的舌型模来说可取：

$$b = d$$

式中，b 为模桥厚度，mm；d 为舌头直径，mm。

对于空心型材来说，根据具体情况 b 可大于或小于舌头的厚度。

（5）焊合室（或模凹度）

模桥下边舌头根部所形成的凹度形状叫做焊合室或桥凹度。焊合室是获得高强优质焊缝的关键部位，其作用在于保证在模桥下聚集有足够的金属，使焊合室中建立一个超过被



挤压金属屈服强度 10～15 倍的高静水压力，以便被模桥所劈开的若干股金属流在高温高压下能重新焊合起来。

焊合室的大小与管材的壁厚和内径或型材的断面积和形状有关，管壁越厚，内径越大，则焊合室就应越大，但不应影响模桥的强度。当管材内径为 70 mm，壁厚为 10 mm 时，可取焊合室高度为 15 mm，当管材内径为 20 mm，壁厚为 2.5 mm 时，可取焊合室高度为 6 mm 左右。

焊合室的高度还与挤压筒的直径有关，见表 8.4-5。当挤压形状复杂的不对称型材或壁厚不等的型材时，为了均衡金属流速，应根据具体情况调整焊合室的体积。

表 8.4-5　焊合室的高度与挤压筒直径的关系

挤压筒直径/mm	115	130	170	200～270	300 以上
焊合室高度/mm	10	15	20	30	40

(6) 模子

模子结构如图 8.4-33 所示，它与舌模模套组装在一起形成一个完整的舌型模，模子高度与模套的高度相同，模子的外径应比产品的最大外接圆大 8～25 mm。

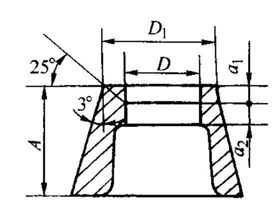


图 8.4-33　模子结构图

模孔尺寸的确定原则与普通管材和型材模孔尺寸的确定原则基本相同，但模孔工作带的设计方法与普通模子略有区别，因为在工作带的有效长度范围内，随着工作带长度的增加，焊缝和基本金属的强度都增加，所以为了保证焊合质量，舌型模模孔的工作带比一般模子要长些，而且在入口侧做成 1°左右的锥角。在挤压空心型材时，位于桥下部分的工作带长度应比其他部分的短一半，以平衡金属的流动。此外，为了均衡金属的流速，舌型模的设计也可采用不等长的工作带、阻碍角、促流角或者多孔排列等方法。

模子一般用热装的方式与模套组成整体。

(7) 舌头的设计

舌头（针）的断面尺寸与普通管材的穿孔针尖或空心型材的芯头的设计方法相同。舌头的长度稍伸出模孔工作带即可，针过长，易使管材或空心型材产生偏心，或划伤产品内表面，但舌头过短，又易使管材出现椭圆或造成型材变形。一般说来，对于小吨位挤压机，舌头伸出工作带的长度可取 2～4 mm，对于大吨位挤压机可达 10 mm。舌头的总长可取焊合室深度、模子人口圆锥部分高度、工作带长度、舌头伸出工作带长度之总和。

为了保证内表面质量，在舌头的端部可做成 5°的倾斜度，并倒 $R=0.5$ mm 的圆弧。

(8) 舌型模加工的技术要求

舌头模的外形和内腔都比较复杂，对空心型材和管材的尺寸精度和内表面质量要求也比较高，所以在加工舌型模时应满足如下技术要求：

1) 舌头与模孔的表面粗糙度应在 $R_a=0.8\ \mu m$ 以上。

2) 各圆弧拐点处应均匀圆滑过渡，不应出现棱角。

3) 舌头与模孔应严格对中，与挤压中心线的偏移度不得大于 0.5 mm。

4) 模子与模套应在组装后共同研磨。

5) 热处理后的硬度应在 48～52HRC 之间。

5.3　空心型材平面分流组合挤压模设计

5.3.1　工作原理与特点

平面分流组合模的工作原理与桥式舌型模一样，是采用实心铸锭，在挤压机挤压力的作用下，金属在经过分流孔时被劈成几股金属流，汇集于焊合室（模腔），在高温、高压、高真空的模腔内又重新被焊合，然后通过模芯与模子所形成的间隙流出，形成所要求的管材或空心型材。平面分流组合模是在桥式舌型模的基础上发展起来的，实质是桥式舌型模的一个变种，即把突桥改成为平面桥，所以又称为平刀式舌型模。这种形式的模子在近年来获得了迅速的发展，并广泛地用于在不带独立穿孔系统的挤压机上生产各种规格和形状的管材和空心型材，特别是民用建筑型材。

(1) 平面分流组合挤压模的主要优点

1) 可以挤压双孔或多孔的内腔十分复杂的空心型材或管材，也可以同时生产多根空心制品，所以生产效率高，这一点是桥式舌型模很难实现甚至无法实现的。

2) 可以挤压悬臂梁很大，用平面模很难生产的半空心型材。

3) 可拆换，易加工，成本较低。

4) 易于分离残料，操作简单，辅助时间短，可在普通的型棒挤压机上用普通的工具完成挤压周期，同时残料短，成品率高。

5) 可实现连续挤压，根据需要截取任意长度的制品。

6) 可以改变分流孔的数目、大小和形状，使断面形状比较复杂、壁厚差较大，难以用工作带、阻碍角和促流角等调节流速的空心型材很好成形。

7) 可以用带锥度的分流孔，实现在小挤压机上挤压外形较大的空心制品，而且能保证有足够的变形量。

(2) 平面分流组合挤压模缺点

1) 焊缝较多，可能会影响制品的组织和力学性能。

2) 要求模子的加工精度较高，特别是对于多孔空心型材，上下模要求严格对中。

3) 与平面模和桥式舌型模相比，变形阻力较大，所以挤压力一般比平面模高 30%～40%，比桥式舌型模高 15%～20%。因此目前只限于生产一些纯铝，铝锰系、铝-镁-硅系等软铝合金。为了用平面分流组合模挤压强度较高的铝合金，可在阳模上加一个保护模，以减少模桥的承压力。

4) 残料分离不干净，有时会影响产品质量，而且不便于修模。

用平面分流组合模挤压的典型产品，最常见的如图 8.4-34 所示。

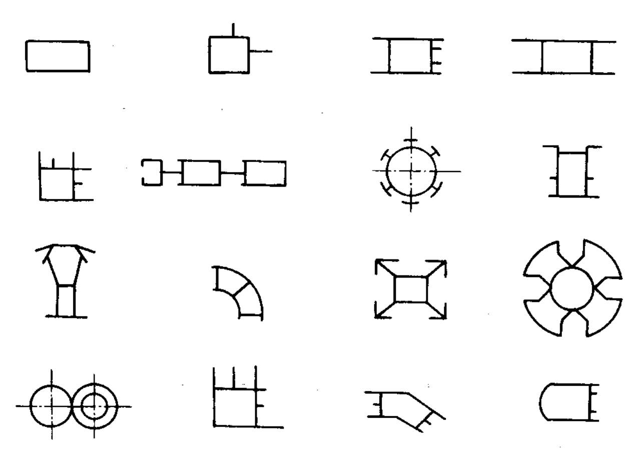


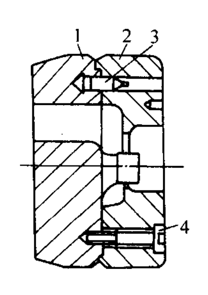
图 8.4-34　平面分流组合模挤压的产品图示例



5.3.2 结构设计

（1）基本结构

平面分流组合模一般是由阳模（上模），阴模（下模），定位销，连接螺钉四部分组成，如图8.4-35所示。上下模组装后装入模支承中，为了保证模具的强度，减少或消除模子变形，有时还要配备专用的模垫和环。



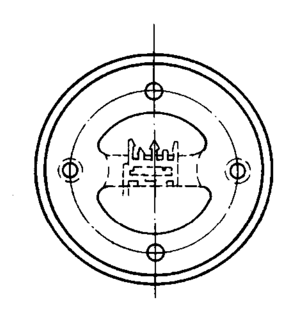


图8.4-35 平面分流模的基本结构图

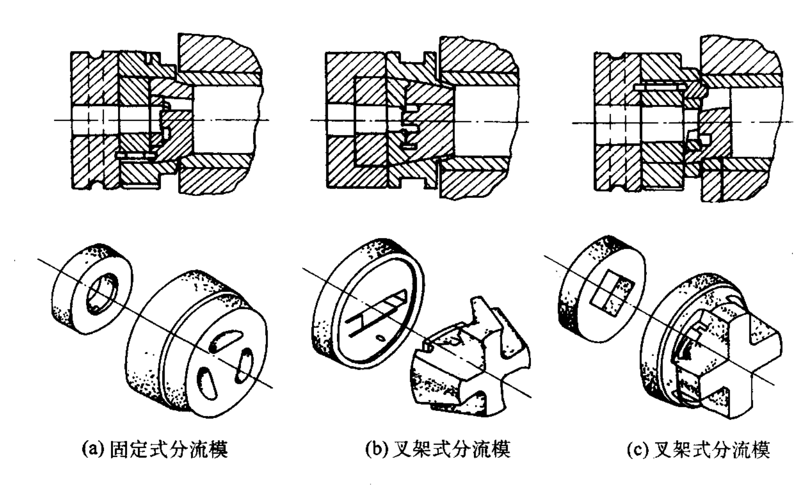
1—阳（上）模；2—阴（下）模；3—定位销；4—联结螺钉

在上模上有分流孔，分流桥和模芯，分流孔是金属通往型孔的通道，分流桥是支承模芯（针）的支架，而模芯（针）用来形成型材内腔的形状和尺寸。

在下模上有焊合室，模孔型腔，工作带和空刀。焊合室是把分流孔流出来的金属汇集在一起重新焊合起来形成以模芯为中心的整体坯料，由于金属不断聚集，静压力不断增大，直至挤出模孔。模孔型腔的工作带部分确定型材的外部尺寸和形状以及调节金属的流速，而空刀部分是为了减少摩擦，使制品能顺利通过，免遭划伤，以保证表面质量。

定位销用来进行上下模的装配定位，而连接螺钉是把上下模牢固地连接在一起，使平面分流模形成一个整体，便于操作，并可增大强度。

此外，按分流桥的结构不同，平面分流组合模又可分为固定式和可拆式的两种。带可拆式分流桥的模具又称之为叉架式分流模，用这种形式的模子，可同时挤压多根空心制品，如图8.4-36所示。



(a) 固定式分流模　(b) 叉架式分流模　(c) 叉架式分流模

图8.4-36 固定式分流模和叉架式分流模

（2）结构参数选择

平面分流组合挤压模的主要参数有分流比，分流孔的形状、大小和分布，分流桥，模芯，焊合室，定径带等，这些参数对产品的质量和模具寿命均有重大影响，必须认真计算和慎重选择。

1）分流比的选择。分流比（K）就是各分流孔的断面积（$\sum F_{分}$）与型材断面积（$F_{型}$）之比，即：

$$K=\frac{\sum F_{分}}{F_{型}} \tag{8.4-4}$$

分流比K的大小直接影响到挤压阻力的大小，制品成形和焊合质量，K值越大，越有利于金属流动与焊合，也可减少挤压力。因此，在模具强度允许的范围内，应尽可能选取较大的K值。在一般情况下，生产空心型材时，取$K=10\sim30$，生产管材时，取$K=8\sim15$。

有时，为了更好地分析挤压过程，反映二次变形的本质，先求出分流孔的面积$F_{分}$与焊合腔断面积$F_{焊}$之比值$K_1=\frac{F_{分}}{F_{焊}}$，然后求出焊合腔断面积$F_{焊}$与型材断面积$F_{型}$之比值$K_2=\frac{F_{焊}}{F_{型}}$，则$K=K_1K_2$。

2）分流孔的形状、断面尺寸、数目及其分布。分流孔是平面分流模的基本结构部分，其形状、断面尺寸，数目及不同的排列方式都直接影响到挤压制品的质量、挤压力和模具的使用寿命，对于每一特定的产品必须设计特定的分流孔。

分流孔的断面形状有圆形、腰子形、扇形及异形等。单孔平面分流模的主要结构形式如图8.4-37所示，分流孔的数目大小，排列见图8.4-38。

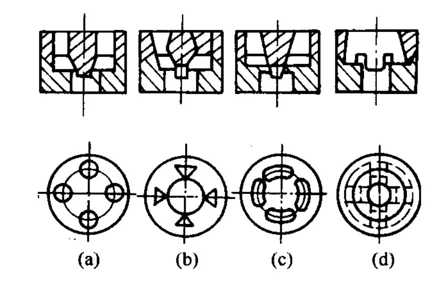


图8.4-37 单孔平面分流模的基本结构形式

（a）四个圆分流孔圆柱形模芯
（b）四个异形分流孔双锥体模芯
（c）四个腰形分流孔锥形模芯
（d）四个异形分流孔插入式模芯

对于方管，矩形管或断面复杂的型材多取扇形和异形分流孔，对于管材或断面简单的型材可取圆形的和腰子形的分流孔，对于扁、宽型材或空心壁板，则应取矩形或弧形的分流孔。

分流孔的数目有两孔、三孔、四孔和多孔多种，这要根据制品的外形尺寸，断面形状，模孔的排列位置等来确定。



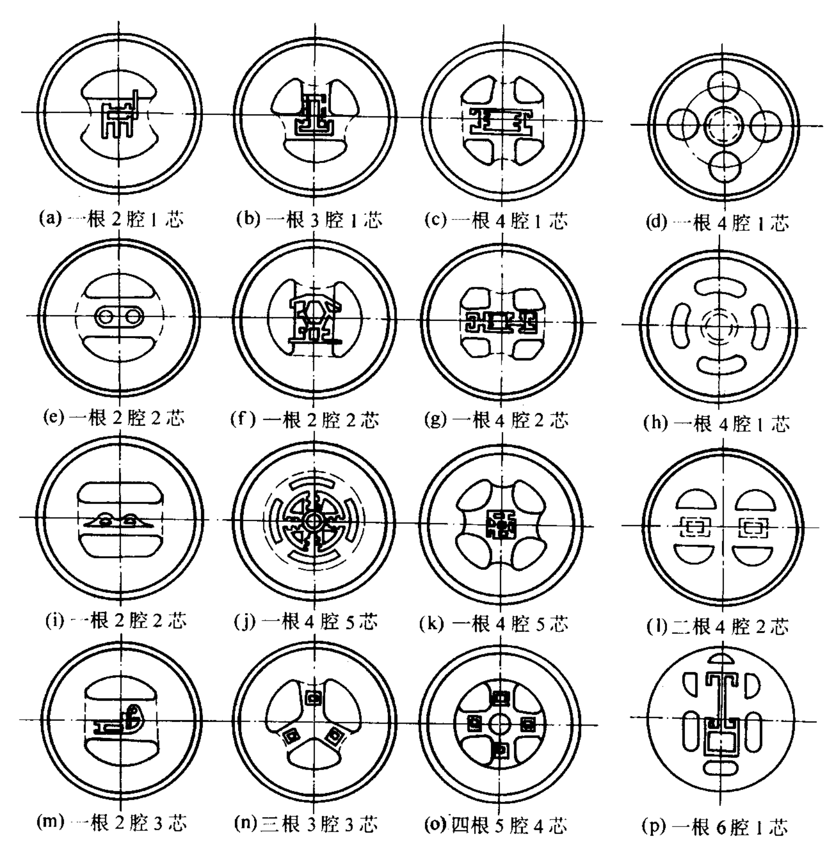


图 8.4-38　分流孔的数目、大小和排列

对于小直径的管材多采用3～4个圆形的或2～3个扇形分流孔；对大直径管材多采用2～3个扇形分流孔；对外形尺寸大，断面形状复杂的管材和型材或空心壁板，则采用4个以上的异形分流孔；对于宽厚比大的扁宽型材或空心壁板，有时采用多达10个以上的矩形分流孔。

在一般情况下，分流孔数目要尽量少，以减少焊合缝，增大分流孔的面积，降低挤压力。

分流孔的断面尺寸主要根据制品的外形尺寸，制品的断面积，以及所要求的分流比，模具的强度等因素来确定。

为了减少挤压力，提高焊缝质量或者对制品的外形尺寸较大，想扩大分流比又受到模子强度的限制时，分流孔可做成斜形孔（分单锥形和双锥形两种），一般说来，其内斜度为1°～3°，外锥度取3°～6°。

分流孔在模子平面上的合理布置，对于平衡金属流速，减少挤压力，促进金属的流动与焊合，提高模具寿命等都有一定的影响。对于对称性较好的空心制品来说，各分流孔的中心圆直径应大致等于$0.7D_{筒}$，此时金属流动较为均匀，而且挤压力最小，模具强度较高，对于非对称空心型材或异形管材来说，应尽量保证各部分的分流比基本相等，或者型材断面积稍大部分的K分值略低于其他部分的K分值，以利于金属均衡流动，此外，分流孔的布置应尽量与制品保持几何相似性。为了保证模具强度和产品质量，分流孔不能布置得过于靠近挤压筒或模具的边缘，但是为了保证金属的合理流动及模具的寿命，分流孔也不宜布置得过于靠近挤压筒中心。

3）分流桥的设计。如图8.4-36所示，分流桥的结构可分两种形式，一种是与上模模套连为整体的，称之为固定式分流桥，一种是与上模模套分开的，称为可拆卸式分流桥，又称之为叉架式分流桥。

分流桥的宽窄与模具强度和金属的流量有关，分流桥的高度直接影响模具寿命，挤压力，以及焊缝质量。从增大分流比、降低挤压力来考虑，分流桥宽度B应选择得小些，但从改善金属流动均匀性来考虑，模孔最好受到分流桥的遮蔽，则B应选择得宽些。一般取：

$$B = b + (3 \sim 20)\ \text{mm} \qquad (8.4\text{-}5)$$

式中，B为分流桥宽度；b为型腔宽度；3～20 mm为经验系数，制品外形及内腔尺寸大的取下限，反之取上限。

在保证模具有足够强度的条件下，分流桥应尽量设计得短而窄。

分流桥的截面形状主要有矩形的，矩形倒角的和水滴形的三种，如图8.4-39所示。

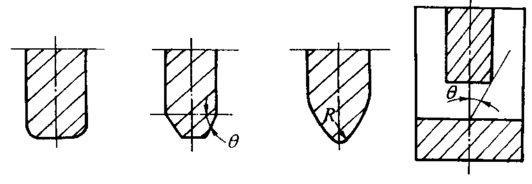


图 8.4-39　分流桥的截面形状

采用矩形截面分流桥时，金属在桥下形成一个死区，不利于金属流动与焊合。矩形倒角截面和水滴形（或近似水滴形）截面的分流桥有利于金属的流动与焊合，而且便于模具加工，因此，在强度允许的条件下，应尽量采用这两种截面的分流桥。

分流桥的斜度（也称之为焊合角θ，见图8.4-39d所示），对焊缝质量有影响，一般取$\theta = 45°$；对难挤压的型材

取 $\theta=30°$，桥底圆角 $R=2\sim5$ mm，焊合室高度 $h_{焊}$ 在 $\left(\frac{1}{2}\sim\frac{2}{3}\right)B$ 的范围 θ 均小于 45°。

即

$$\tan\theta=\frac{\frac{1}{2}B}{h} \tag{8.4-6}$$

式中，θ 为分流桥的焊合角；h 为焊合室的高度；B 为分流桥的宽度。

为了增加桥的强度，通常在桥的两端增加桥墩，蝶形桥墩不仅增加了桥的强度，而且改善了金属的流动，避免死区产生。

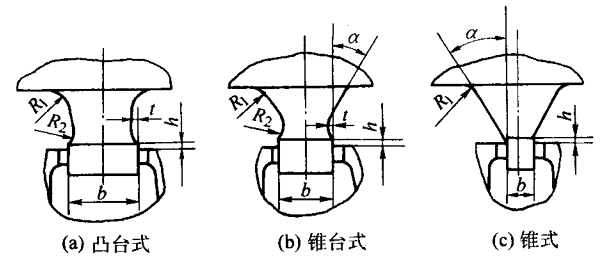
4）模芯（或舌头）的设计。模芯相当于穿孔针，其定径区，决定制品的内腔形状和尺寸，其结构直接影响模具的强度、金属焊合质量和模具的加工方式。

模芯的结构形式，常见的有三种：

① 圆柱形模芯（图 8.4-37a），多用于挤压圆管，具有加工方便，易于清理模具，挤压力较低等优点。但不宜挤压型材和异形管材。

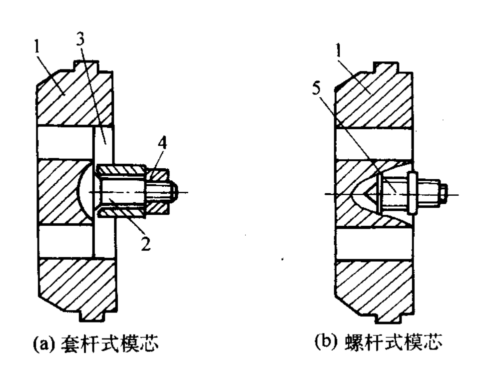
② 双锥体模芯（图 8.4-37b），用于生产方管和空心型材，不便于加工和清理，但易于修模和调整流速。

③ 锥体模芯（图 8.4-37c），用于挤压方管，矩形管及空心型材。模芯的定径带有凸台式、锥台式和锥式三种，模宽度在 $b<10$ mm 时多采用锥式；在 10 mm $<b<$ 20 mm 时多采用锥台式；在 $b>20$ mm 时，多采用凸台式（图 8.4-40）。在某些情况下可采用特殊的模芯结构，见图 8.4-41 和图 8.4-42。



(a) 凸台式　(b) 锥台式　(c) 锥式

图 8.4-40　模芯定径带的结构形式



(a) 套杆式模芯　(b) 螺杆式模芯

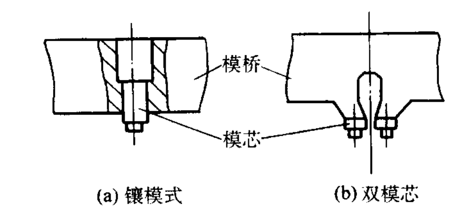
图 8.4-41　套杆式、螺杆式模芯结构图

1—上模；2—套杆；3—浮动套；4—螺母；5—螺杆式模芯

模芯的长度宜短，稍伸出定径带即可，过长易使管子偏心，过短则易形成椭圆，对于小挤压机模芯可伸出模子定径带 1～3 mm，对于大吨位挤压机可伸出 10～12 mm。

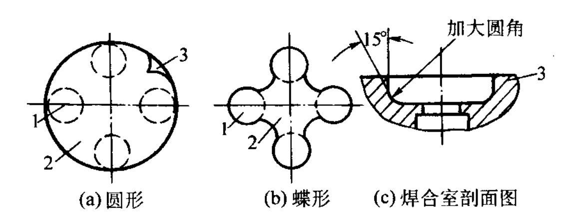
5）焊合室设计。焊合室的形状、入口方式和尺寸大小对于金属流动、焊接质量、挤压力的大小有很大的影响。

常用的焊合室截面形状有圆形和蝶形两种，当采用圆形焊合室（图 8.4-43a）时，在两分流孔之间会产生一个十分明显的死区，不仅增大挤压阻力，而且会影响焊缝质量。蝶形焊合室（图 8.4-43b）有利于消除这种死区，提高焊缝质量，为了消除焊合室边缘与模孔平面之间的接合处的死区，可采用大圆角（$R=5\sim20$ mm），或将焊合室的入口处作成 15°左右的角度，同时，在与蝶形焊合室对应的分流桥根部也做成相应的凸台，这样就改善了金属的流动，减少了挤压阻力。因此，应尽量采用这种蝶形截面的焊合室。



(a) 镶模式　(b) 双模芯

图 8.4-42　特殊结构的模芯



(a) 圆形　(b) 蝶形　(c) 焊合室剖面图

图 8.4-43　焊合室形状

1—分流孔；2—焊合室；3—死区

当平面分流模同时挤压二根空心型材时，可以设计一个共用分流孔；为了避免金属流动不均匀，在焊合室内可设计一个隔墙，相当于二个焊合室，如图 8.4-44 所示。

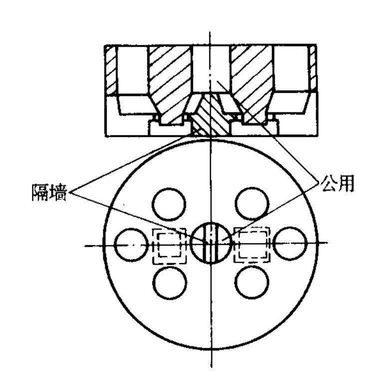


图 8.4-44　公用分流孔示意图

焊合室一般设计在下模（阴模）上，也可设计在上模（阳模）上，有时也有在上、下模设计各半的情况。

焊合室是金属集聚并焊合的地方，焊合腔的容积越大，焊合腔的截面积与制品断面之比越大，则焊合腔所建立起来的静水压力就越大，金属在焊合腔中停留的时间就越长，因而，焊接的质量就越高。可能采用的挤压速度就越大，当分流孔的形状、数目及分布确定之后，焊合室的断面积也基本确定。因此，合理设计焊合室的高度有重大意义，当焊合室太浅时，由于摩擦力太小不能建立起足够的反压力，而使焊合压力不足，导致焊合不良，同时，还限制了挤压速度的提高，但太深又会影响模芯的稳定性，易出现空心制品壁厚不均匀现象，同时分离残料后，积存金属过多，会降低制品的成品率。

为了获得高强度的焊缝，在焊合室中必须建立一个超过挤压金属屈服强度 10～20 倍高的静水压力。随着管材壁厚的增加和空心型材断面积增大，焊接腔的高度也应增大，一般情况下，焊合室高度应大于分流桥宽度的一半。对于中小

型挤压机来说，焊合室高度可取 10~20 mm 或等于管壁厚度的 6~10 倍。在很多情况下，可根据挤压筒的直径来确定焊合室的高度。在现场生产中 h 取值如下：

ϕ95~ϕ130 mm 的挤压筒取 $h=10\sim15$ mm

ϕ150~ϕ200 mm 的挤压筒取 $h=20\sim25$ mm

ϕ200~ϕ280 mm 的挤压筒取 $h=30\sim35$ mm

ϕ300~ϕ500 mm 的挤压筒取 $h=40\sim50$ mm

ϕ500 mm 以上的挤压筒取 $h=40\sim80$ mm。

6）模孔尺寸的设计　用平面分流模生产的产品，绝大多数为铝合金民用型材和管材，这些材料的形状复杂，外部尺寸大，壁厚很薄，并要求在保证强度的情况下尽量减轻重量，减少用材和降低成本。因此，外形和壁厚尺寸可按下偏差考虑。在模具设计时，主要考虑制品冷却后的收缩量和拉矫后的缩减量。模子外形的模孔尺寸 A 可由下式确定制品：

$$A=A_0+KA_0=(1+K)A_0$$

式中，A 为制品外形的模孔尺寸；A_0 为制品外形的公称尺寸；K 为经验系数，对铝合金一般取 0.007~0.015，常用的 6063 合金，可取 $K=0.012$，2A12 和 7A04 合金取 $K=0.01$。

制品壁厚的模孔尺寸 B 可由下式确定：

$$B=B_0+\Delta$$

式中，B 为制品壁厚的模孔尺寸；B_0 为制品壁厚的公称尺寸；Δ 为壁厚模孔尺寸增量，当 $B_0\leqslant 3$ mm 时，$\Delta=0.1$ mm，当 $B>3$ mm 时，$\Delta=0.2$ mm。

对外部尺寸大或是具有悬臂梁的型材，挤压时，模具易产生弹塑性变形，从而可能引起制品的壁厚尺寸变小。因此，对壁厚模孔尺寸进行修正，即适当加大难成形或易产生弹塑性变形处的壁厚模孔尺寸。

7）模孔工作带长度的确定。确定平面分流组合模的模腔工作带长度要比平面模复杂得多，因为它不仅要考虑到型材的壁厚差，距挤压筒中心的远近，而且必须考虑到模孔被分流桥遮蔽的情况以及分流孔的大小和分布，在某些情况下从分流孔中流入的金属量的分布甚至对调节金属流动起主导作用，特别是在按不等分流孔的原则设计模子时更是如此。处于分流桥底下的模孔由于金属流进困难，工作带必须减薄。选取分流桥下壁厚最薄而流动阻力最大的地方作为模腔工作带长度的最短处，此处工作带的长度为壁厚的两倍。壁厚较厚或金属容易流动和供料较充分的地方，工作带长度可参考上述最小值适当加长，一般按型材模孔各区段工作带长度与其面积成正比，与其周长成反比的公式进行初步计算，然后再加上易流动的修正值。

平面分流组合模的工作带长度应较平面模的大些，这对金属的焊合有好处。

8）模孔空刀结构设计。因用平面分流组合模挤压的制品壁厚都比较薄，故空刀结构应合理选择，当制品壁厚大于 2.0 mm 时可采用容易加工的空刀结构（图 8.4-45a、b），当壁厚小于 2.0 mm 时或带有悬臂处和危险断面处可用图 8.4-45c、d 型空刀结构，为降低工作阻力，增加其强度，工作带出口处应作 1°~3°的斜角（图 8.4-45d、e）。

5.4　阶段变断面型材挤压模设计

5.4.1　阶段变断面型材的生产特点

阶段变断面型材是指沿型材长度上断面形状和尺寸发生阶段式变化的一种特殊型材，它主要用于制造承载很大的构件。

阶段变断面型材一般由基本型材、过渡区和尾部断面很大的所谓"大头"三部分组成。型材的大头用作接头，长度一般为 100~600 mm。过渡区一般长 40~60 mm，是为了易于挤压和精修所必须的工艺余量。但近来也出现了一种过渡

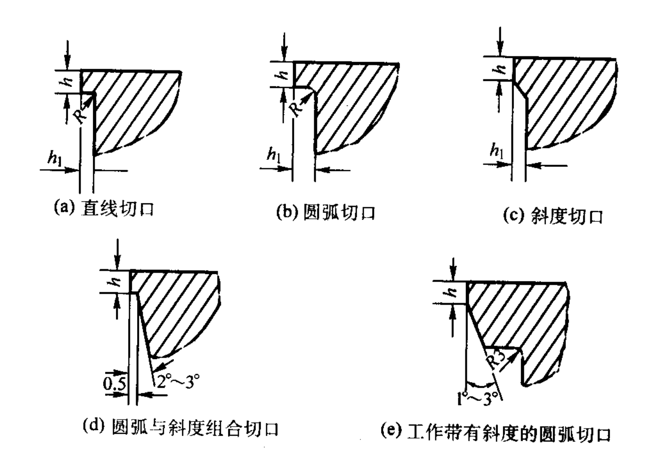


图 8.4-45　平面分流模模孔空刀结构

区长达 2.5 m 的阶段变断面型材，在这种情况下，过渡区已成为型材主要结构部分之一。基本型材部分的长度不限，可达 10~20 m。

大头部分和基本型材部分面积之比是表示型材生产工艺难易程度的基本指标之一，目前，已能生产该指数达到 10 以上的复杂型材。

根据基本型材和大头部分的形状，阶段变断面型材可分为丁字形、工字形、槽形、Z 字形和异形断面等类型，见图 8.1-8。

如前所述，挤压阶段变断面型材有以下几种方法：

1）分步挤压基本型材断面和大头部分的方法，此法可分为采用两套分瓣模分步挤压基本型材部分与大头部分的方法，以及采用三套分瓣模分步挤压基本型材、过渡区与大头部分的方法。

2）一次挤压基本型材部分与大头部分的方法，即在模支承内同时装入一套用于挤压大头部分的整体模和一套用以挤压基本型材部分的分瓣模，在一个挤压过程中同时完成型材与大头部分的挤压。此法又可分为用支承环固定型材模的挤压方法，以及采用能在两个工位滑动的楔键的方法。

3）用异形挤压筒的挤压方法。

4）机械换模法。

这几种方法的主要差别在于所用的模子套数、外形结构和装卸方法不同，各有优点和缺点，适用范围也不一样。

5.4.2　阶段变断面型材模具的结构要素与设计特点

（1）结构要素

用两套分瓣模分步挤压基本型材部分和大头部分的方法，是挤压阶段变断面型材最常用的方法。这种挤压方法所用模具的特点是，型材和过渡区设计成一套模子，而大头部分设计成另一套模子。

用两套可拆开的模子挤压阶段变断面型材时，要求其模具的拆开与装配应十分方便。同时，在挤压过程中要保持一定的完整性和稳定性，即在挤压时尺寸不发生任何变化，因此，模具的外形结构和尺寸与一般型材模具不同，而应适合于阶段变断面型材挤压的特点。阶段变断面型材模具的外形结构和尺寸如图 8.4-46 和表 8.4-6 所示。

为了方便更换模具，可拆开的型材模的厚度应比尾端"大头"模的多 20~30 mm。为使模具在拆换过程中操作方便，在每瓣型材模块背后均钻有一个 ϕ20~30 mm 的孔。

为了保持模具在挤压过程中的完整性，采用前后锥角同时配合的方法，其前锥角为 10°，与挤压筒衬套相配合，其后锥角为 4°，与压型嘴（模支承）相配合，并应相应设计一套挤压阶段变断面型材专用的压型嘴和挤压筒内套。

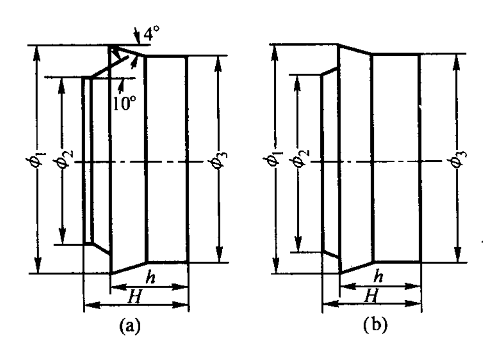


图 8.4-46　阶段变断面型材模具的外形结构图
(a) 挤压基本型材部分发型材模；(b) 挤压尾端大头部分的尾端模

压型嘴（模支承）的出口尺寸与形状应与阶段变断面型材大头部分的形状相似，在保持大头能顺利通过的条件下，其尺寸应尽量缩小，以提高模孔尺寸的稳定性。

应合理选择和加工模子的线性配合尺寸 h。当尺寸 h 超过上偏差时，模具不能组成理想的整体，挤压出的型材尺寸可能超差；当尺寸 h 超下偏差时，虽然模具能组成一个理想的整体，但拆卸模具时将造成很大困难。因此，尺寸 h 的加工偏差应小于 0.1 mm。

(2) 模子分模面的确定

型材模分瓣形式和分瓣块数根据型材形状来确定。分模面的位置应当是便于拆卸和安装，既保证制品的尺寸，又不损伤型材表面。型材模一般可分成三瓣（对于“⊥”、“⎍⎎”形型材）或四瓣（对于“工”形型材）。对于“工”形型材来说，为了方便卸模，其上下平面应做成 1°～2°的倾角，即拔模角，见图 8.4-47。

表 8.4-6　阶段变断面型材挤压模具外形尺寸

挤压机/MN	挤压筒 ϕ/mm	模子种类	模子尺寸/mm					
			ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	H	h
19.6	200	型材模	225	200	216		125	93
		尾端模	225		216	205.4	105	93
19.6	170	型材模	195	170	187		125	93
		尾端模	195		187		105	93
12.25	130	型材模	195	130	187	175	110	82
		尾端模	195		187	133	95	82

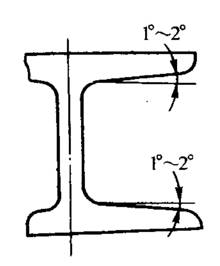


图 8.4-47　“工”形型材的拔模角

大头（尾端）模的模孔形状应与型材相似，分瓣的形式应便于装卸，不损伤制品表面，一般来说，尾端模可分成左右对称的两瓣，见图 8.4-48。

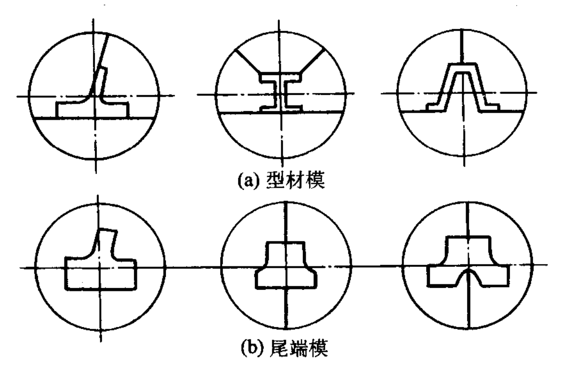
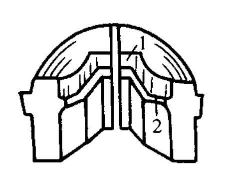


图 8.4-48　分模面示意图

(3) 过渡区的设计

在型材模上有一段长约 50 mm 的连接大头和基本型材断面的过渡区，其入口尺寸小于尾端模孔尺寸（沿周边缩小 2 mm，而用均匀圆滑过渡的曲线与基本型材模孔相连。图 8.4-49 为带有过渡区→的“⎰⎺⎺⎱”形型材的型材模孔立体剖视图，图 8.4-50 为“工”形型材模的过渡区，50 mm 为过渡区深度。如过渡区入口与型材模孔之间连接圆弧的曲率半径 R 较小时，将形成一段死区，如 $a-a$ 剖面Ⅱ侧所示。可能在型材过渡区出现粗晶。为了减少这种粗晶的出现，可把过渡区连接圆弧的曲率半径 R 增大，使之近似等于金属的自然流动角如 $a-a$ 剖面之Ⅰ侧所示。



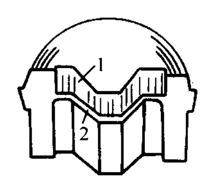
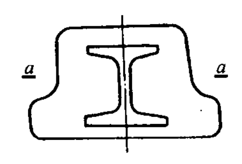


图 8.4-49　阶段变断面型材模立体剖视图
1—过渡区；2—模孔



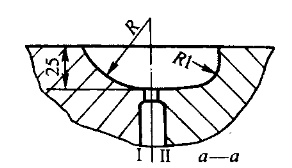


图 8.4-50　阶段变断面型材模的过渡区
Ⅰ侧—R 较大，形成自然流动角；Ⅱ侧—R 较小，易形成死区

(4) 模孔尺寸的确定

影响阶段变断面型材模和尾端模的模孔尺寸与工作带长短的因素及计算原则，与普通型材模的基本相同。但是考虑到变断面模具的结构特点，其模孔尺寸均应比普通型材模小 0.1～0.2 mm。为了保证大头部分挤压时的金属流动均匀性，以减少其对型材部分根部的影响，尾端模的工作带长度可在很宽的范围内变化（2～25 mm）。

模孔尺寸的具体计算方法可参照以下公式进行，外形轮



廓尺寸、高度 H 和宽度 B 的计算方法与一般型材模的相同。

$$B_1 = B(1+\mu) + K \tag{8.4-7}$$

$$H_1 = H(1+\mu) + K \tag{8.4-8}$$

式中，B_1、H_1 为分别为模孔尺寸；B、H 为分别为型材尺寸；μ 为综合修正系数，考虑到热收缩量、拉矫变形量、模子本身的弹塑性弯曲等因素的影响，对铝合金来说取 0.7% ~ 1.0%；K 为尺寸正公差。

$$b_1 = b + K \tag{8.4-9}$$

式中，b_1 为模孔尺寸；b 为型材壁厚尺寸；K 为尺寸正公差。

扩孔尺寸 l_1

$$l_1 = l - \frac{1}{2}K \tag{8.4-10}$$

式中，l_1 为扩口处模孔尺寸；l 为型材扩口处尺寸；K 为扩口尺寸正公差。

(5) 专用支承垫和专用导路

可根据型材的形状，设计几种典型的专用支承垫。专用支承垫的出口尺寸和形状应当与尾端模相似，但在保证尾端部分能顺利通过的情况下，出口尺寸应尽量设计得小一些，以提高型材的尺寸稳定性。

为了防止在挤压过程中型材产生扭拧弯曲等缺陷，与生产普通型材一样，应配上相应导路，阶段变断面型材的导路多为方形可拆卸式的，上盖可用活动销钉固定，便于生产。

为了保证型材模和尾端的同心度与尺寸稳定性，阶段变断面型材应采用专用挤压筒挤压，专用挤压筒与挤压模接触一端应设计两个锥度。10°锥与模子配合用，而 15°锥与压型嘴配合用，这样能保证挤压筒与模子之间的紧密配合。防止挤压过程中金属从缝中流出。

5.5 渐变断面型材挤压模设计

5.5.1 渐变断面型材挤压模具的种类及其工作特点

渐变断面型材是一种在一定区域范围内断面尺寸逐渐均匀变化的型材，这种型材主要用作承力构件。

逐渐变断面型材的种类繁多，一般按其厚度变化的特点可分为三类：

第一类，一个壁厚均匀变化的，如丁字形，槽形型材等。

第二类，两个壁厚同时均匀变化的，如角形型材等。

第三类，两个壁厚同时变化，但变化是不相等的，如不对称的角形型材等。

挤压此三种型材所需的工具基本上是相同的。只是第二、第三类型材的工具在生产时调整较为困难。

挤压渐变断面型材的方法主要有两种，一种是带有锥度的异形针挤压法，另一种是利用一套组合式模具的挤压法。

锥形针挤压法与用随动针挤压管材的方法相类似，用此法只能挤压形状简单的逐渐变断面型材，而且工具的设计与制造都很困难，型材表面质量也不好，因此应用不广。

用一套组合式可动模挤压法，就是将挤压模的一部分设计成可上下自由滑动的部件（即可动模），在挤压过程中，可动模借助于仿形尺的作用作逐渐上升或下降的运动，从而逐渐改变模孔尺寸，以达到使型材断面逐渐变化的目的。根据可动模在挤压过程中的升降条件，此法可分为下降法和上升法。

下降法的特点是在挤压过程中，可动模随仿形尺的向前移动而逐渐下降，此法是先挤压型材的薄壁端，后挤压型材的厚壁端。

上升法的原理和模具结构与下降法相同，只是在挤压过程中，可动模随仿形尺的向前移动而逐渐上升，此法是先挤压型材的厚壁端，后挤压型材的薄壁端。

5.5.2 渐变断面型材模具的设计

用上升法挤压渐变断面型材时，其主要的挤压工具有固定模，可动模与仿形尺，配套的工具有挤压筒衬套，压型嘴，保护模等。仿形尺与可动模是关键的工具，可动模的升降都是由仿形尺来实现的。挤压开始时，可动模处于最下端，与固定模组成最大模孔，当仿形尺的斜面与可动模接触后，可动模沿着仿形尺的斜面上升，从而改变了模孔尺寸，由大截面逐渐过渡到小截面，同时，挤压出一根断面逐渐变化的型材来。工具配置见图 8.4-51。

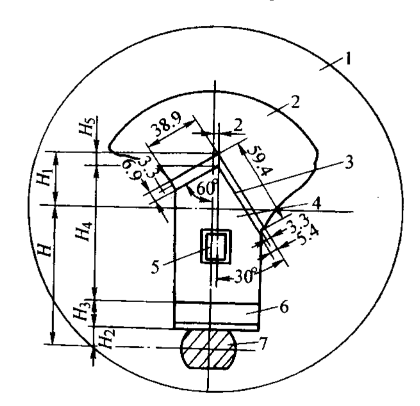


图 8.4-51 渐变断面型材模具相对位置剖视图
1—压型嘴；2—固定模；3—模孔；4—可动模；5—固定销；6—可动模座；7—仿形尺

(1) 挤压筒内套的设计

与挤压普通型材用挤压筒不同，渐变断面型材用挤压筒的内套上开有一个通孔，用以放置仿形尺。通孔的直径一般要比仿形尺的直径大 2 ~ 3 mm，为防止通孔降低挤压筒的强度，在设计时，应合理安排通孔的位置和计算通孔的最大许可直径。挤压筒内套可用 5CrNiMo 钢制造，热处理后的硬度为 42 ~ 48HRC。

(2) 保护模的设计

保护模主要用来保护可动模的升降，模孔作成 10° ~ 15° 的斜面以保证金属的足够填充，模孔的尺寸应比固定模模孔尺寸大，一般应按固定模模孔尺寸沿四周向外扩大 1.5 ~ 2 mm。

为了消除应力集中，防止破裂，保护模各模孔拐角处应做成圆弧，为了防止下塌变形，在设计时应考虑保护模的厚度和固定销的断面面积。保护模一般用 3Cr2W8V 钢制造，热处理后的硬度为 48 ~ 52HRC。

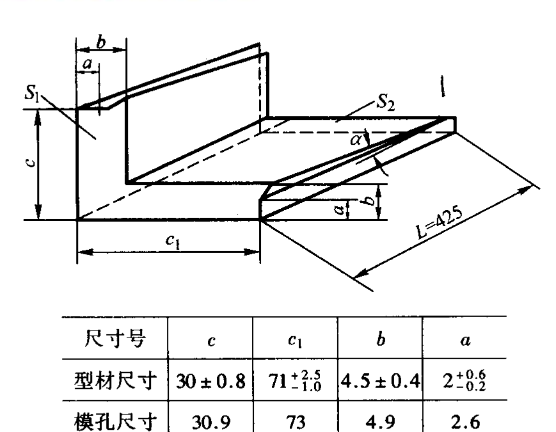
(3) 固定模，可动模，可动模座及固定销的设计

固定模孔尺寸的设计原则与普通型材模的设计相同，即型材断面宽向长向的模孔尺寸等于型材名义尺寸，正公差与 0.007 × 型材名义尺寸之和，型材断面厚度模孔尺寸等于型材名义厚度与正公差之和（见图 8.4-52）。

可动模与可动模座是用螺钉连接在一起的一个活动部件，其厚度为固定模厚度的一半，可动模与可动模座的总高度由模孔的位置和挤压筒内套的中心线至仿形尺的中心线距离而定。为了调节可动模和可动模座的高度，在二者之间可加入调整片。在挤压过程中，可动模座由于承受仿形尺的强烈磨损，故需经常更换。

固定销主要用来支承保护模，使之不产生下塌变形现象，保护模的寿命与固定销的支承面有很大关系，支承面越大越好，故在保证可动模强度的条件下，固定销的直径应尽





尺寸号	c	c_1	b	a
型材尺寸	30±0.8	$71^{+2.5}_{-1.0}$	4.5±0.4	$2^{+0.6}_{-0.2}$
模孔尺寸	30.9	73	4.9	2.6

图 8.4-52　渐变断面型材挤压模孔尺寸设计举例

量增大，且离模孔越近越好。固定销应与固定模牢固装配并一起研磨。见图 8.4-51。

(4) 仿形尺的设计

挤压渐变断面型材的关键在于仿形尺的设计，因为型材断面尺寸的变化是由仿形尺的曲面来完成的。在挤压时，由于仿形尺的前进，可动模受到仿形尺曲面的作用开始上升，控制型材断面尺寸的变化和确定型材的挤压长度。

仿形尺的直径可根据生产实践经验和具体情况来选定，但必须验算其在挤压时所受的应力，见图 8.4-53。

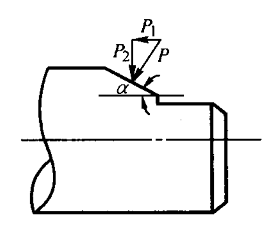


图 8.4-53　仿形尺强度计算图

P 为挤压时仿形尺曲面上所受的正压力，P_1 和 P_2 是由于 P 的作用产生的分力，其中 $P_1 = P\sin\alpha$，为仿形尺所受的轴向压力。因仿形尺在挤压筒的通孔中进行工作，所以受到通孔内壁的支承作用，故不需校核纵向弯曲强度，只需按以下公式校核纵向挤压强度。

$$\psi\sigma_{许} = \frac{P_1}{F} \qquad (8.4\text{-}11)$$

式中，$\sigma_{许}$ 为许用压应力；F 为仿形尺断面积；P_1 为仿形尺所受的轴向压力；ψ 为折减系数，依柔度 λ 而定。

$$\lambda = \frac{\mu l}{\sqrt{\frac{J}{F}}} \qquad (8.4\text{-}12)$$

式中，μ 为依两端固定情况而定的系数，此处取 $\mu = 1.3$；l 为仿形尺长度；J 为断面惯性矩，可取 $J = \frac{\pi D^4}{64}$。

求出 λ 后，由《材料力学手册》上的有关表格可查出 φ，但因 P_1 受很多因素的影响，很难求出精确的数值。所以在实际生产中，往往不经强度校验而凭生产经验直接确定仿形尺的直径。

仿形尺曲面部分的计算是基于体积不变的概念来进行的，即是一定长度的型材体积应与一定长度的铸锭体积相等。

图 8.4-54 为型材 ПК1790 用仿形尺分段计算图。

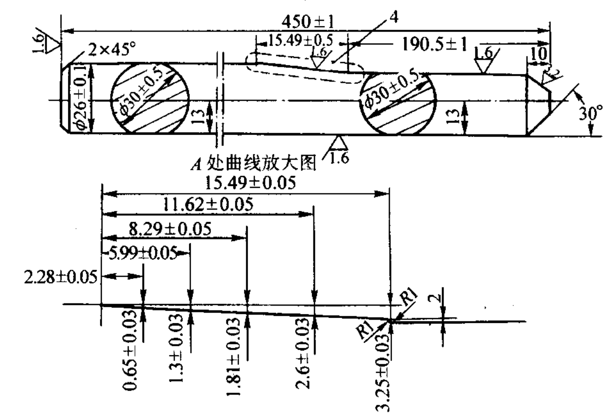


图 8.4-54　ПК1790 型材用仿形尺分段计算图
（材料 3Cr2W8；淬火、回火后硬度为 48～52HRC）

仿形尺的总长度 = 铸锭长度 + 压挤垫厚度 + 保护模厚度 + 固定模厚度 + 适当余量。

推杆的长度除了要满足型材前端长度的需要外，还应保证在开始挤压之前比固定模凸出 20～30 mm，逐渐变断面型材用工具的位置关系如图 8.4-55 所示。

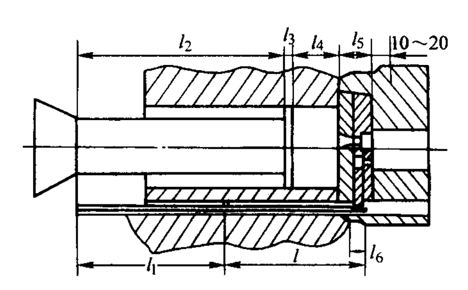


图 8.4-55　渐变断面型材用工具的位置关系图

$$l + l_1 = l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + (20 \sim 30\ \text{mm})$$
$$l = l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + (20 \sim 30\ \text{mm}) - l_1$$

式中，l 为仿形尺长度；l_1 为推杆长度；l_2 为压挤轴长度；l_3 为挤压垫厚度；l_4 为挤压所需铸锭长度；l_5 为保护模与固定模的总厚度；l_6 为仿形尺前端长度，等于型材前端断面不变部分所需铸锭长度 + $\frac{3}{4}$（固定模厚度）+（20～30 mm）。

(5) 模孔的排列原则

模孔排列的原则根据渐变断面型材的外形尺寸和壁厚变化情况而定（见图 8.4-51），一般是先确定纵向坐标值 H_1 和 H，然后根据各个零件的相对位置来确定其他坐标值。

$$H_1 + H = H_2 + H_3 + H_4 + H_5$$

式中，H 为挤压筒内套中心至该内套壁厚 $\frac{1}{2}$ 处的距离；H_1 为模孔坐标值；H_2 为仿形尺起始点的偏心中；H_3 为可动模座高度；H_4 为可动模高度；H_5 为可动模上升最大距离。

可动模与可动模座的总高度：

$$H_3 + H_4 = H + H_1 - H_2 - H_5$$

(6) 其他工具



当仿形尺的形状与尺寸确定之后，推杆的尺寸即可确定。

压型嘴，导路等工具与一般型材的相同，可通用。

5.6 扁宽带筋壁板型材挤压模设计

5.6.1 带筋壁板型材的挤压特点及模具的工作条件

带筋壁板是一种宽度很宽，厚度很薄（即宽厚比很大），而带有纵向筋条的特殊型材，它作为一种新型的整体结构材料，已广泛用于国民经济的各个部门和人民生活的各个方面。

根据断面形状和生产难易程度不同，带筋壁板可分为三类。

第一类为对称型壁板，即壁板的筋条相对于轴线呈对称分布；

第二类为不对称型壁板，即壁板的一侧在其板宽度上超过 160 mm 的区段上无筋条；

第三类为完全不对称型壁板，即沿壁板宽度上有明显的横截面变化。

因为壁板型材的宽厚比大（一般在 50 以上），形状十分复杂，单位横截面上的表面积又很大，所以是一种十分难挤压的型材。特别是对于宽厚比大于 100，壁厚小于 3 mm，宽度大于 800 mm，长度大于 10 m 的实心和空心壁板及硬合金壁板，在挤压时必须采取一些特殊的工艺措施和特殊结构的模具，才能生产出合格的产品。

壁板挤压的方法很多，根据产品的类型、规格以及合金牌号等不同，可分别采用圆筒挤压法，扁筒挤压法，宽展挤压法及空心壁板挤压法等。

圆筒挤压法又可分为圆筒平板法、圆筒 V 形法、圆筒圆管法。圆筒平板法主要用来生产宽度较窄（1 000 mm 以下）而壁厚 5 mm 以上的军用和强力结构的硬质合金壁板，是目前广泛采用的方法之一，可在现行的挤压机上采用挤压普通型材的模具结构来进行生产。圆筒 V 形法，由于模具的设计与制造比较困难，模子上存在有突出较大的舌头，受力条件恶劣，挤压时易压塌、变形等一系列问题，故未获得广泛的采用。圆筒空心锭带筋管法可获得宽度最大（可大于 2 500 mm）的壁板，也是目前世界上广为采用的方法之一，可在大型双动挤压机上采用挤压异形管的模具结构生产宽度大，壁厚薄，但质量要求不太严格的硬合金壁板。

扁筒挤压法也可分为平板法和 V 形法。扁筒平板法是一种简单适用的方法，目前获得了最广泛的应用，可在各种挤压机上采用普通的圆形结构模具或扁形结构模具生产形状复杂、壁厚较薄、长度较长、宽度中等（1 200 mm 以下）质量要求高的军用或强力结构用硬合金壁板。

扁筒 V 形法由于模具的设计，制造比较困难，模具寿命较短和展平工序复杂，所以目前很少采用。

宽展挤压法主要用于在没有扁挤压筒的挤压机上，生产中等宽度而形状较为简单的软合金实心壁板，用此法生产壁板需要增加一套下文将谈到的宽展模系统。

空心壁板挤压法近年来也获得广泛的应用，主要用扁筒平面分流组合模法（当无扁筒时采用圆筒组合模法或宽展组合模法）来生产宽度中等（1 000 mm 左右）的多孔空心软合金壁板。

5.6.2 带筋壁板型材模具结构

如前所述，根据壁板的类型、规格、被挤压的合金以及挤压方法的不同，应选用不同的模具结构。较为常用的有扁模结构系统，圆模结构系统，宽展模结构系统和分流组合模结构系统以及带筋管挤压工具结构系统。

（1）扁模结构系统

用扁挤压筒挤压壁板的首次试验，是用伸入挤压筒口内的扁模子进行的，见图 8.4-56。挤压轴产生的挤压力作用于模子上，而笨重的挤压筒保护着它，使它的挤压过程中不发生变形。模支承及其他工具也应与扁模子的结构相适应。

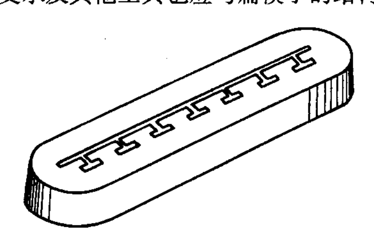


图 8.4-56 伸入挤压筒内的扁模子

扁挤压的主要优点是可节约大量贵重的高合金模具钢材，由于模子的体积减少，质量变轻，在加工制造时比较轻巧，但用这种模子挤压时，壁板的腹板会明显变薄，其中心部位尤为严重。这是由于作用在模子端面上的摩擦应力使模子产生了压缩变形，以及挤压方向的正应力（等于塑性变形区的单位流动压力），使模子产生了弯曲变形。

由于单位流动压力的分力与摩擦力的方向相反，模孔端面上受的压力，在很大程度上可用在模子端面上形成的倾斜度来平衡。模子端面的倾斜度过大时，由于推力作用所产生的变形量不仅可以与压缩变形量相等，有时还会超过压缩变形量，因而腹板的厚度将会超过名义尺寸。所以，模子端面的倾角通常不应大于 7° ~ 10°。

因为在挤压过程中引起模孔收缩的力是不均匀的，因而模孔变形可出现明显的差异，这种差异沿壁板宽度方向可达 0.3 mm 以上。

（2）圆模结构系统

为了提高刚度，将壁板模设计成圆模结构系统，这样可增大抵抗相对于挤压筒横截面长轴方向的弯矩的能力。然而，即使在这种情况下，挤压的模子也会产生相当大的变形，特别是在挤压工具加热不充分时以及挤压过程中铸锭在挤压筒内变冷的情况下更是如此。模子上的正压力，特别是模子接触表面上的摩擦力，在接近挤压后期会增大，因而，使模孔变形增大。

与扁模子系统相比，圆模子系统具有比扁挤压筒长轴方向上大得多的抗弯矩能力。所以，在大多数情况下，用圆模结构系统来挤压带筋壁板。

图 8.4-57 为用于 50 MN 和 125 MN 挤压机上挤压宽带筋壁板的圆模结构系统的尺寸。

圆形模子结构系统包括圆形模子、模垫、模环及与之相配的模支承。

在挤压过程中，把安装在圆形模支承的圆模子靠近挤压筒的端面。为了确保接触紧密和防止金属溢出，要尽量减少模子与挤压筒的接触面，增大接触应力。

圆模子的变形比扁模子的变形小得多，尽管如此，圆模子仍然会发生相当大的弹性变形，在很多情况下，挤压时还会发生塑性变形。

（3）宽展模结构系统

在没有扁挤压筒的挤压机上，为了挤压外接圆直径大于圆筒直径的扁宽型材或壁板，可以在一般的成形模（平面模或者组合模）前边，靠近挤压筒的工作端面，增设一个宽展模，宽展模的模腔具有哑铃形断面，呈喇叭形向前扩展。当圆形铸锭镦粗后通过宽展模时，产生第一次变形，其厚度变薄，宽度逐渐增大到大于圆挤压筒直径，然后通过成形模产生二次变形，这样，宽展模起到了扁挤压筒的作用。

宽展挤压的优点是可以挤压比圆筒直径更宽的壁板型材，模具容易加工，成本低，省掉了设计和制造都很复杂、价格又昂贵的扁挤压筒；缺点是，模子清理，修复比较困难，



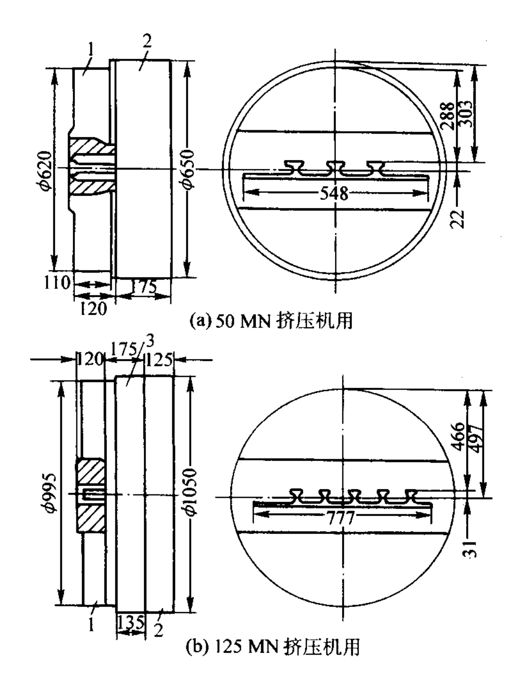


图 8.4-57　用扁挤压筒挤压壁板的圆形模具结构组件
1—模子；2—模垫；3—垫板

挤压力较一般挤压时高 20% 左右，因而很难挤压变形系数大，宽度比大的硬合金壁板。

宽展模可以与平面模，也可以与组合模配合使用，可在一般挤压机上使用现有的工具正向挤压壁板或扁宽型材。

（4）空心壁板挤压模系统

一般用穿孔针法挤压单孔管材和异形空心型材，但用此法来挤压形状复杂的多孔空心壁板没有多大实用价值。随着挤压技术的发展和模具结构的改进，出现了用舌型模挤压法，叉架模挤压法和平面分流模挤压法生产多孔空心壁板的方案，见图 8.4-58。这三种方法都是基于同一原理，即在挤压力作用下，迫使金属流经舌桥或分流孔，被劈成两股或多股流入焊合室，并在高温、高压、高真空状态下重新焊合起来，从舌芯与模子之间的间隙流出，形成所需形状和尺寸的多孔空心壁板，所以，在壁板断面上都会留下多条焊缝的痕迹。

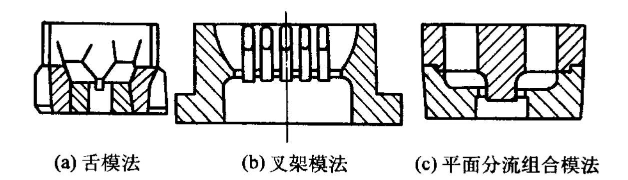


图 8.4-58　空心壁板的挤压模具结构

从扩大产品品种范围，提高生产效率和成品率等方面来看，平面分流组合模挤压法是生产多孔空心壁板最有效的方法，用这种方法可以在普通型棒挤压机上用实心铸锭通过圆筒法、扁筒法和宽展法获得不同材料、不同宽度、形状复杂、内外表面光洁的多孔空心壁板。

（5）带筋管挤压工具结构系统

在圆挤压筒上用挤压圆带筋管并随后剖分、展开，精整的方法可以生产宽度 2 m 以上的特大型整体带筋壁板。因采用空心铸锭和穿孔针，故提高了挤压筒的比压，但相应减少了铸锭的体积，从而使壁板的长度受到了限制。

带筋管挤压一般在 50 MN 以上的大型挤压机上进行，为了提高产品质量，减少挤压力和提高生产率，带筋管的反挤压法获得了广泛的应用。

带筋管挤压的工具结构与无缝管挤压的工具结构基本相同，主要包括穿孔针系统和模子组件。如果生产内带筋管，则在穿孔针上应开出筋槽，针的加工和修理十分困难。如果生产外带筋管，则筋槽开在模子上，这与普通型材模生产相似，加工、装配和修理都比较方便，因此，在生产中均采用后一种工具结构。

5.6.3　壁板模的设计原则及特点

用平板法挤压壁板时的应力应变状态是十分复杂的，金属的流动也极不均匀，挤出产品的前端与尾端，中心与边缘的尺寸往往相差很大（有时达 0.8 ~ 1.0 mm）；易产生波浪、扭拧、刀弯等废品，模子易开裂变形。因此，为了提高产品质量，延长模子寿命，除了合理设计型材、严格控制工艺因素外，对型材在平面模子上的布置，模腔尺寸和工作带（阻碍角或助推角），模子外形等应作合理的考虑。

为了调整流速，合理分配金属流量，改善流动特性，对称型壁板应尽量使模孔截面中心与挤压筒截面中心相吻合。不对称型壁板应适当增加工艺余量，以减少其不对称性。对于腹板厚度不同的壁板，应使较薄的部分靠近挤压筒中心。

在确定模孔尺寸时主要考虑热收缩、模孔的弹性与塑性变形，模子的整体弯曲和拉伸矫直时制品尺寸的变化等因素。在挤压壁板时，由于各个部分的尺寸变化规律有很大差异，所以在设计时，模孔尺寸应分成几部分来进行计算。比如，带 T 字形筋条的壁板，可以分为两部分——底板部分和筋条部分来考虑。宽厚比大的底板尺寸（包括相关尺寸），由于模子的弹性与塑性变形，模子整体弯曲的影响，挤压时有严重的减薄现象，减薄的程度与合金成分，壁板的形状规格、宽厚比、工艺制度、模子强度（模子材料和外形尺寸）等有关，有时达 3 mm 以上，所以在确定底板部分的模孔尺寸时，名义尺寸应加上技术条件所允许的最大正公差。为了补偿弹性和塑性变形，根据壁板宽度及其与挤压筒的相对位置，应把模孔尺寸增大 0.8 ~ 1.3 mm。为了补偿模子的整体弹性弯曲，模孔尺寸应从两边向中部，均匀地增加 1 ~ 1.65 mm。

目前尚无计算壁板底板处模孔尺寸的定量公式。只能根据生产经验来确定，一般来说，壁板越宽、越薄，宽厚比越大，被挤压合金变形抗力越高，作用在模子上的应力就越大，模子变形就越大。对挤压工具的变形进行了长期观察之后表明，当挤压壁板底板厚度等于或大于 6 mm，挤压系数为 12 ~ 15 时，模子实际上不产生残余变形。

生产实践表明，模孔的整体弯曲主要取决于壁板底板模孔的宽度与厚度以及相对于挤压筒中心的位置。在设计模孔尺寸时，一般来说，中心部分应比壁板的名义尺寸大2.5 mm左右，而两侧边的尺寸应比名义尺寸大 1.5 mm 左右。

模孔中心部位的弹性变形主要取决于壁板的规格和被挤压合金的变形抗力，而与挤压次数关系不大。模孔的塑性变形随挤压次数的增加而逐渐减少，比如，在用扁挤压筒挤压硬合金壁板时，在模孔中心处的塑性变形，第一次挤压后为 0.9 mm，第二次挤压后减至 0.3 mm，而在第三、四次挤压后，模孔的塑性变形实际上停止了。

上述结果可由表 8.4-7 和图 8.4-59 得到证实。

除了底板以外的筋条部分，受弹性、塑性压缩的以及整体弯曲的影响极小，所以只考虑产品的公差、热收缩量和拉伸矫直量等，也就是说可按普通型材的变化规律来设计这些部分的模腔尺寸。为了调节金属流速，改善变形条件，防止波浪、扭拧、刀弯等废品，必须合理设计模子的工作带长度，它主要与型材设计的部位距挤压筒中心的距离有关，一般取 5 ~ 15 mm。经验证明，对宽厚比大的壁板阻碍角的意义并不大。

表 8.4-7 模孔的变形和挤压壁板尺寸的测量结果（与图 8.4-59 结合使用）

测量项目	测量值（在以下各横断面上）/mm									
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	Ⅹ
名义尺寸	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
制模后的模孔尺寸	4.3	4.3	4.7	4.9	5.1	5.1	4.9	4.7	4.5	4.3
第一次挤压后的模孔尺寸	3.7	3.8	4.2	4.1	4.2	4.1	4.1	4.1	3.9	3.7
第一次挤压后的壁板腹板尺寸	2.7	2.0	2.0	2.0	1.85	1.8	1.9	2.0	2.0	2.7
第一次修模后模孔尺寸	+0.8 4.5	+1.5 5.3	+1.5 5.7	+1.6 5.7	+1.7 5.9	+1.7 5.9	+1.6 5.7	+1.5 5.6	+1.5 5.4	+0.8 4.5
第二次挤压后壁板腹板尺寸										
V形	2.35	3.35	3.5	3.4	3.45	3.4	3.4	3.4	3.35	2.35
U形	3.35	3.45	3.4	3.2	3.25	3.25	3.25	3.4	3.5	3.6
第二次挤压后模孔尺寸	4.3	5.1	5.3	5.3	5.6	5.6	5.3	5.3	5.1	4.3
第二次修模后模孔尺寸	+0.3 4.6	+0.3 5.4	+0.3 5.6	+0.5 5.8	+0.4 6	+0.4 6	+0.4 5.7	+0.3 5.7	+0.2 5.3	+0.1 4.4
第二次修模后壁板腹板尺寸										
V形	2.75	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.75	3.8	3.65	3.65
U形	2.8	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.65	3.8	3.5	3.9
第三次修模尺寸	+0.6									+0.2
第四次挤压后壁板腹板尺寸										
V形	3.55	3.6	3.7	3.65	3.65	3.7	3.55	3.65	3.52	3.2
U形	4.2	3.7	3.6	3.6	3.55	3.5	3.5	3.7	3.8	3.9



图 8.4-59 测量模孔和挤压壁板尺寸的示意图
（Ⅰ～Ⅹ为测量点）

为了加速金属向窄缝流动，弥补挤压时模孔的变形，有时在模子工作端平面上作 6°～8°的助推角，如图 8.4-60 所示。

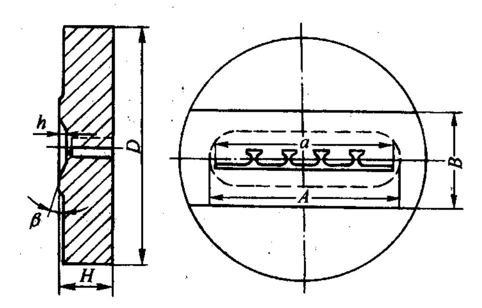


图 8.4-60 壁板模子的助推角
$\beta = 6° \sim 8°$

模子强度对壁板的成形和尺寸精度有很大影响，所以要选择合理的模子外形，优质的模具材料和适当的热处理硬度。对于大型挤压机一般采用如图 8.4-57 所示的模子外形结构和尺寸。选用 3Cr2W8V 钢或 H13 钢作为模具材料，热处理后的硬度为 46～50HRC。

5.7 民用建筑型材挤压模设计

5.7.1 铝合金民用建筑型材的特点

随着国民经济的发展和人民生活水平的提高，铝合金民用建筑型材的品种和数量成倍增长。目前，民用建筑型材成了铝合金型材一个重要的分支，世界各国建成了上千条民用建筑型材生产线，其工艺装备、生产工艺和模具的设计与制造均已基本定型，具有标准化、系列化的特点：

1）民用建筑型材绝大多数采用 6063T5 合金生产，这是因为 6063 合金质轻，具有良好的塑性，工艺成形性能好，在高温下变形抗力低，具有良好的表面处理性能。因此，可以用它生产出轻巧、美观、耐用的优质型材。

2）为了适应不同地区、不同用途、不同系列的门窗结构和其他建筑结构的需要，铝合金民用建筑型材的品种繁多，规格范围十分宽广，据不完全统计，世界上已研制出上万种建筑型材。其横截面积范围为 0.1～100 cm^2，外接圆直径范围为 $\phi 8 \sim \phi 300$ mm，腹板厚度范围为 0.6～15 mm。

3）型材壁厚薄（绝大多数型材的壁厚为 0.6～2 mm），形状十分复杂，且断面变化剧烈，相关尺寸多且尺寸精度要求高，技术难度大，大多数为超高精度薄壁型材。

4）建筑型材中的空心制品比例很大（空心型材与实心型材之比大约 1:1），而且内腔多为异型孔，有的常为多孔异形薄壁空心制品。

5）一组建筑型材需要组装成不同的门窗系列或其他的建筑结构，因此配合面多，装配尺寸多，装饰面多。为了减少型材品种，要求型材具有通用性和互换性，这就提高了型材的精度要求和表面质量要求。

由于铝合金民用建筑型材具有上述特点，增大了模具设计与制造的难度。

5.7.2 民用建筑型材模具的设计特点

6063T5 铝合金民用建筑型材模具的设计除了遵循普通模具的设计原则以外，尚具有如下的特点：

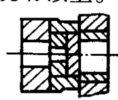
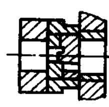
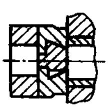
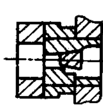
1）挤压机（挤压筒）的最佳比压范围为 450～700 MPa。

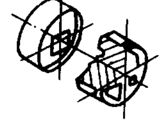
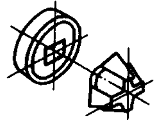
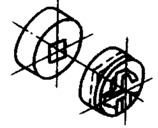
2）挤压系数的最佳范围为50～90。

3）最佳比压和挤压系数可通过挤压机、挤压筒、挤压工艺参数、铸锭长度以及模孔孔数来进行调节。

（1）模具种类及其结构特征

挤压铝合金民用建筑型材的模具可分为平面模和空心模两大类，见图8.4-61。空心模又可分为平面分流组合模，星形组合模，舌形模，其中平面分流组合模最为常用，占95%以上。

(a) 平面模　(b) 平面分流组合模　(c) 星形挤压模　(d) 桥式舌形模

图8.4-61　建筑型材模的种类

平面模用于挤压实心型材，模子可以做得很薄，在15 MN以下的中小型挤压机上使用的模子厚度可到20～25 mm，16～35 MN挤压机上可取30 mm左右。薄模易于加工制造，便于修模和抛光工作带表面。为了保证模子强度和产品的尺寸稳定性，可增加模子垫的厚度或数目。

平面分流组合模用于挤压空心型材，因需经二次变形，故所需挤压力较大，易造成闷车。用这种模具挤压空心型材，成品率较高，模具易于加工制造，生产操作简便，能生产各种高精度、高光洁表面的形状复杂的薄壁空心型材和多孔空心型材，但在挤压中或挤压完毕时修模和清理残料较困难。

星形组合模适用于外形尺寸较大的空心型材，挤压力较平面分流模的小，型材成品率较高，残料清理也较容易，但模子加工较困难。

舌形模残料较长，型材成品率低，模具加工难度介于两者之间，但挤压阻力较小，且在挤压中或挤压结束时残料容易清理干净，修模方便，故多用于挤压需要较高挤压力和质量要求较高的薄壁空心型材或硬合金军工铝材，表8.4-8中列出了三种空心型材模的优缺点。

表8.4-8　三种空心型材模具的比较表

模子种类	挤压工艺性能（挤压阻力）	产品质量（成品率）	模子加工难易度	清理金属和修模	适　用　范　围
平面分流组合模	不好	良好	易	难	所有空心制品
星形组合模	中等	良好	难	中等	外形尺寸大的空心型材
舌形模	良好	不好	中等	易	硬合金高质量薄壁空心型材

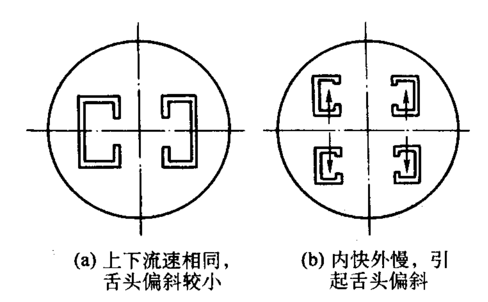
（2）模孔在模子平面上的布置原则

1）应考虑型材挤压出模孔时在出料台上的稳定性，以防扭弯型材。

2）装饰面不要与出料台面直接接触，以防划伤表面。

3）应考虑靠近挤压筒中心的金属比靠近边缘的金属流动较快的因素，所以型材的薄壁部分应尽可能靠近挤压筒中心。

4）对于槽形型材，其模孔布置时应避免金属流动快慢不均而造成的舌头偏斜，引起型材壁厚不均，见图8.4-62。



(a) 上下流速相同，舌头偏斜较小　(b) 内快外慢，引起舌头偏斜

图8.4-62　槽形型材的模孔布置

5）模孔最大外接圆与模孔周边距离的对应见表8.4-9和表8.4-10。

表8.4-9　平面模的布置

模孔数	模子外径/mm	模孔外接圆直径/mm
多孔模	180	130
多孔模	230	155
多孔模	280	200
单孔模	180	110
单孔模	230	130
单孔模	280	170

表8.4-10　平面分流组合模的布置

模子外径/mm	入料孔之外接圆直径/mm
150	100
180	130
200	140
230	160
250	180
280	200

（3）模腔形状及其在模子平面上的布置

模子入料腔的数目、形状、大小及其在模子平面上的排列，对金属流动影响极大，应根据挤压筒的大小、产品的形状、挤压产品的根数及其排列位置来确定入料腔的形状和数目。模腔的设计应保证模孔金属流动的均匀性，在保证模子强度的条件下应尽量设计得大些。

图8.4-63为几种常见的排列方式。

（4）模孔尺寸的确定

模孔尺寸按下式确定：

$$模孔外形尺寸 = A_0 + (1.01\% \sim 1.02\%)A_0 \quad (8.4\text{-}13)$$

式中，A_0 为型材外形的名义尺寸。

$$模孔壁厚尺寸 = S_0 + (1.01\% \sim 1.02\%)S_0 + C \quad (8.4\text{-}14)$$

式中，S_0 为型材壁厚名义尺寸；C 为经验修正值。

（5）模孔工作带的确定原则

工作带厚薄是调整金属流动速度的关键因素，工作带设计不当，型材各部分流出模孔的速度就不均匀，挤压出的制品就会产生扭拧、弯曲和平面间隙大等缺陷，为了合理给定工作带，应考虑影响工作带长度的两个主要因素。



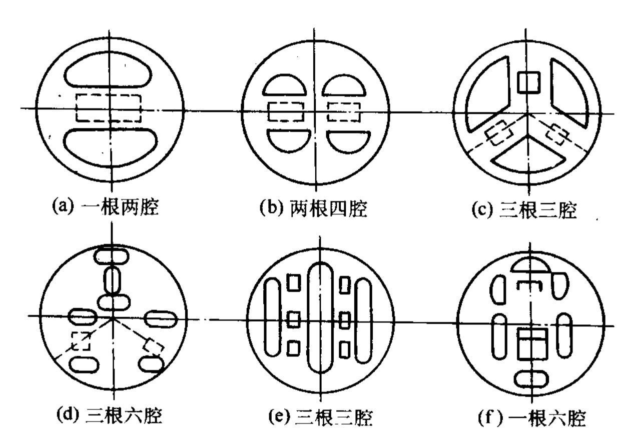


图 8.4-63　平面分流模分流孔，模腔孔数和排列位置

第一，模孔排列位置对金属流动的影响。挤压时金属的流动特性是靠近挤压筒中心部位的金属流动快，远离中心逐渐减慢，为此，如使金属流动均匀，必须把中心部位的模孔工作带做得厚些，远离中心处逐渐减薄。模孔工作带变化数值与挤压筒直径有关，图 8.4-64 为挤压时的金属流动速度表。

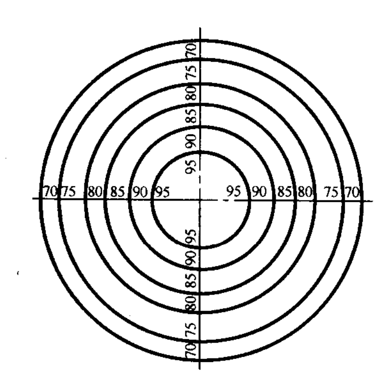


图 8.4-64　金属流动速度图

第二，型材壁厚对金属流速的影响。型材越厚越大即模孔尺寸越大，则金属流动就越快，因此为了调整流速，此处的工作带就应做得厚些。

根据上述两个因素，模孔工作带可按如下公式计算：

$$L = tK_1K_2 \qquad (8.4\text{-}15)$$

式中，L 为工作带长度，mm；t 为型材厚度名义尺寸，mm；K_1 为模子材质强度系数，$K_1 \approx 1.5 \sim 2.0$；K_2 为模孔位置流速差之比，可由图 8.4-64 查出，如 $K_2 = \dfrac{95}{80}$。

(6) 模孔工作带长度的确定方法

平面模模孔工作带长度按下列方法确定。

1) 设计工作带长度时，以整个型材最难挤出（成形）部分为基准点，取该处工作带长度为成品厚度的 1.5 ~ 2 倍，以图 8.4-65 中的型材为例，该型材的壁厚为 t，由于其宽度较大，两端部出料较难（见虚线部分），故以此处作为设计工作带的基准点，取 $L=$ (1.5 ~ 2) t。

2) 与基准点相邻部位的工作带长度较基准点工作带长 1 mm，见图 8.4-65。

3) 型材厚度相同部位，如其距离挤压筒中心的距离相等，那么，工作带的长度应相等。

4) 由模子中心算起，每远离中心 10 mm 则其工作带应相应减少，如表 8.4-11 示出的数值，见图 8.4-66。

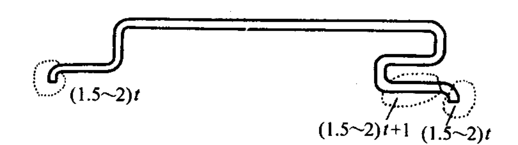


图 8.4-65　实心型材模孔工作带基准点的选取

表 8.4-11　型材厚度与工作带对应关系

型材厚度/mm	每相距 10 mm 工作带增减数值/mm
1.2	0.2
1.5	0.23
2.0	0.30
2.5	0.35
3.0	0.40

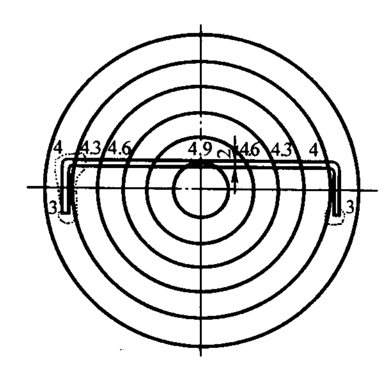


图 8.4-66　工作带长度与距中心的关系

5) 其他情况相同时，工作带的长度与该处的厚度成正比，见图 8.4-67。

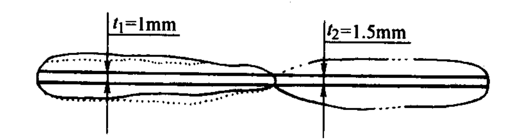


图 8.4-67　工作带长度与厚度的关系

在 $t_1 = 1$ mm 处工作带长 $l_1 = 2$ mm，$t_2 = 1.5$ mm 处的工作带长度为：

$$l_2 = \frac{l_1 t_2}{t_1} = 3\ \text{mm}$$

6) 型材螺纹孔处，工作带应增加 1 mm（图 8.4-68a），型材两边交接处有圆弧 R 的地方工作带应大 1 mm（图 8.4-68b）。

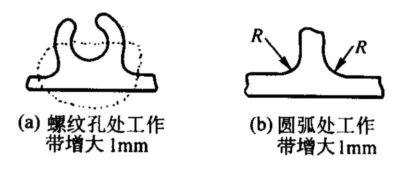


图 8.4-68　工作带增大示意图

7) 型材模孔的端部，因三面受阻，金属流速较慢，故此处的工作带应减少 1 mm，见图 8.4-69 的圆圈处。

分流组合模模孔工作带长度按下列方法确定。

1) 桥底入料困难处工作带长度为型材厚度之 2 倍，即 $L = 2t$。靠近入料口处的模孔，因金属流动较好，工作带应为 $2t + 1$ mm，见图 8.4-70。

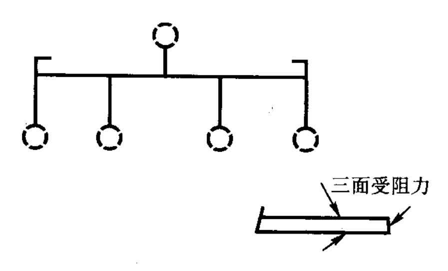


图 8.4-69　模孔端部工作带变化图示
（虚线圆圈处的工作带应减短）

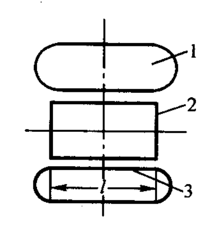


图 8.4-70　分流组合空心部位的工作带
1—入料孔；2—工作带长等于 $2t$；
3—工作带长等于 $2t+1$

2）型材空心部分工作带长度与通位长度 l 有关，见图 8.4-71。

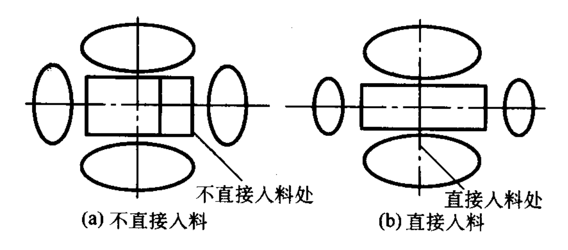


图 8.4-71　分流组合模实心模孔部分的工作带

当 $l=15\sim20$ mm 时，工作带长度为 $2t+1+0.5$ mm；
$l=21\sim30$ mm 时，工作带长度为 $2t+1+1$ mm；
$l=30$ mm 以上时，按上述比例增加。

3）与空心部分（通心部分）相接的实心模孔部分的工作带与分流孔的大小、形状和分布有关，桥底及入料不直接流入的模孔工作带取 3 倍厚度加 1 mm，即 $L=3t+1$ mm，入料直接流入的模孔工作带取厚度的 4～5 倍，即 $l=(4\sim5)t$。

（7）调整金属流速的特殊方法

1）导流法。在模子工作端面上做一个深度 15～20 mm 的凹兜，将金属导入模孔并用合理设计导流孔的大小和形状来调节金属的流速。如对于槽形型材，常见的两种缺陷就可用导流法来解决，如图 8.4-72 所示。

2）促流法。在模子工作端面做成各种不同的促流角来调整金属的流速，如壁厚变化的楔形型材，在窄孔处促流角做得大些，在宽孔处促流角做得小些，但最大促流角不得大于 45°，如图 8.4-73 所示。

3）阻碍法。在模子工作带端面根据型材的壁厚设计成不同的阻碍角来调剂金属流速。在挤压空心型材时容易出现凸起和凹下缺陷，可用如图 8.4-74 所示的方法来修正。凸起缺陷削去 A 处，凹下缺陷削去 B 处。调节方法是消除阳模障碍。

（8）模子空刀的设计

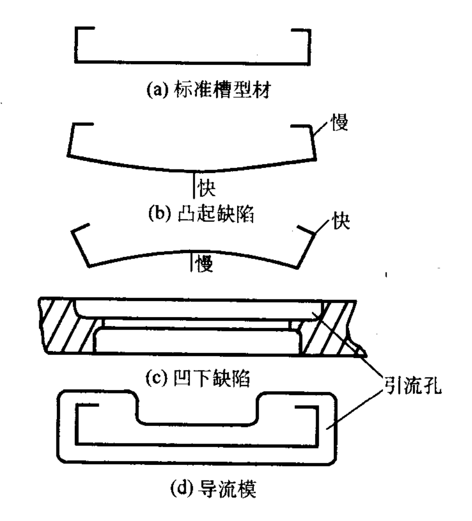


图 8.4-72　用导流法来调整金属流速

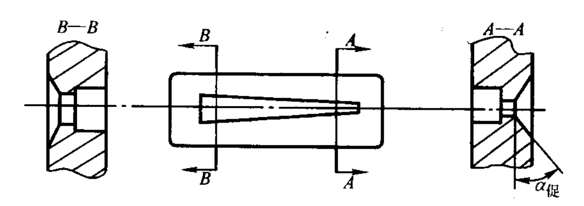


图 8.4-73　用促流法调整金属流速

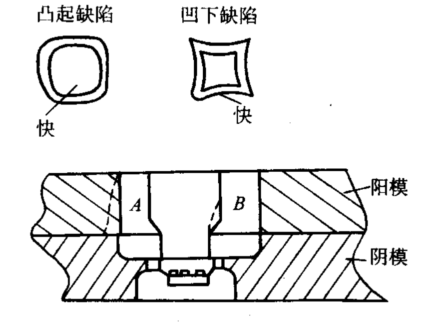


图 8.4-74　用阻碍法调整金属流速

1）对于一般型材模来说，空刀部位尺寸比模孔尺寸大 3 mm（单边 1.5 mm），对于小规格或薄壁型材，为了协调相关位置或为了增大模子的强度，空刀尺寸可减小到单边 0.5～1 mm。

2）为了防止型材与模壁相擦，空刀部分可采用 3°～5° 的锥形出口。

3）型材的螺纹孔及毛刷坑位后的空刀应适当减短。

4）易堵模的型材，空刀部分应作成锥形。

5）为保证型材能顺利通过模孔，模子空刀部分、模垫、模支承垫的尺寸一般按如下原则确定：

模子空刀尺寸 = 模孔尺寸 +（1～3）mm；
模垫尺寸 = 模孔尺寸 +（6～12）mm；
模支承垫尺寸 = 模孔尺寸 +（10～20）mm。

（9）模子厚度的设计

对于民用建筑型材，平面模的厚度一般取 25～30 mm，分流组合模的厚度由强度校核确定，一般取 80～185 mm，导流模的厚度一般取 15～25 mm。

编写：夏巨谌（华中科技大学）
闫　洪（南昌大学）



第5章 型材挤压凹模优化设计

型材挤压凹模，特别在挤压复杂断面型材、空心型材、大直径小内孔的厚壁管材时，工模具内会产生很大的附加应力，或引起很高的应力集中。在细长件、薄壁空心件（如实心和空心挤压轴，穿孔针组件等）中，还会受到偏心载荷、冲击载荷、扭曲和横向弯曲应力的作用。主应力和这些附加应力迭加，会形成很高的工作应力。在这种复合应力的作用下，工模具最易丧失其稳定性、产生弯曲、扭断。

因此，对型材挤压凹模必须进行优化设计，以便得优质的挤压型材和提高型材挤压模具的使用寿命。目前型材挤压凹模优化设计的方法主要有基于传统方法的优化设计和基于现代方法的优化设计。

1 基于传统方法的优化设计

基于传统方法的优化设计主要是基于传统设计理论和经验的方法，其目的主要是控制型材挤压时各部分流速的均匀性。其常用方法有如下几种。

1.1 改变模孔工作带的几何形状与尺寸

工作带长度是设计型材模孔最重要的几何参数之一，它直接影响着制品的质量，如刀弯、扭拧、波浪、麻点等缺陷几乎都是由工作带的设计与制造不合理所引起的。工作带对金属流动起阻碍作用，增加工作带长度可以增大摩擦阻力，使向该处流动的供应体积中的流动静压力增大，迫使金属向阻力小的部位流动，从而使型材整个断面上金属流量趋于均匀。对于外形尺寸较小，对称性较好，各部分壁厚相等或近似相等的简单型材来说，模孔各部分的工作带可取相等或基本相等的长度，依金属种类、型材品种和形状不同，一般可取2~8 mm。对于断面形状复杂、壁厚差大、外形轮廓大的型材，在设计模孔时，要借助于不同的工作带长度来调节金属的流速。

大家知道，型材的横断面形状越复杂，各部分厚度尺寸相差越悬殊，尺寸对称性越差，则挤压时各点的应力与变形就越复杂，流动越不均匀，因而就越容易产生各种挤压缺陷。为了方便起见，在设计时根据型材断面各部分厚度之差异，将其分成若干区段：F_1、F_2、F_3、…，见图8.5-1。若使挤压出来的型材平直而无弯曲，薄壁处不产生波浪，交界处不产生裂纹，获得精确的几何形状、刚度稳定之优质型材，必须保证型材各区段上金属质点的流动速度均等，也即是要保证各区段上金属质点的流动应力均等，这就是合理确定型材模孔工作带长度的基本出发点。

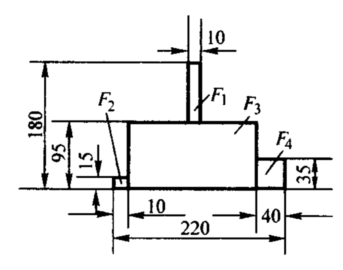


图8.5-1 型材断面分区示意图

计算型材工作带长度的方法有多种，以下仅介绍补充应力法。

根据С.И. 古布金关于挤压力计算公式的演变形式，确定型材各区段金属质点流经模孔时的应力：

$$\sigma_M = \sigma_{S.T}\left[\left(\frac{h_{定} S_{型} \mu_\beta}{f_{型}} + \frac{b}{a}\right)\left(\frac{F_{锭}}{f_{型}}\right)^a - \frac{b}{a} + m\right] \tag{8.5-1}$$

式中，σ_M 为金属质点的流动应力；$\sigma_{S.T}$为在挤压温度下金属质点流经模孔工作带时的真实变形抗力；$h_{定}$ 为模孔工作带长度；$S_{型}$ 为型材断面之周长；$F_{锭}$、$f_{型}$ 为分别为铸锭和型材的断面积；μ_β 为金属与模孔工作带之间的摩擦系数。

$$a = \frac{1}{\cos\frac{\alpha_1}{2}} + \frac{\mu_\beta}{\tan\alpha_1 \cos\frac{\alpha_1}{2}} - 1 \tag{8.5-2}$$

$$b = \frac{1}{\cos\frac{\alpha_1}{2}} + \frac{\mu_\beta}{\tan\alpha_1 \cos\frac{\alpha_1}{2}} = a + 1 \tag{8.5-3}$$

$$m = \frac{4}{3\sqrt{3}}\left(\tan\alpha_1 + \frac{\mu_\beta}{2}\right) \tag{8.5-4}$$

$$\alpha_1 = 90° - \beta \tag{8.5-5}$$

式中，β 为挤压时金属的自然流动角，因金属性能随挤压工艺条件而变，对于同一金属，可近似地写出关系式 $\beta \propto \frac{1}{\lambda}$，如图8.5-2所示，一般情况下，正挤压过程中，$\beta$ 取15°~45°，常用20°~30°。

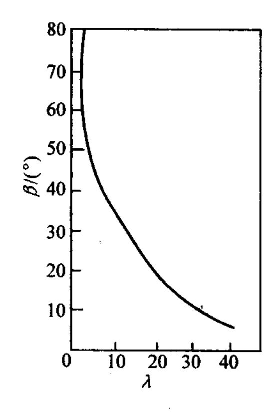


图8.5-2 挤压系数 λ 与金属自然流动角 β 之间的近似关系曲线

根据式（8.5-1）求出各区段 F_1、F_2、F_3、…、F_n 上的流动应力：

$$\sigma_{MF_1} = \sigma_{S.T}\left[\left(\frac{h_{F_1} S_{F_1} \mu_\beta}{f_{F_1}} + \frac{b}{a}\right)\left(\frac{F_{锭}}{f_{型}}\right)^a - \frac{b}{a} + m\right] \tag{8.5-6}$$

$$\sigma_{MF_2} = \sigma_{S.T}\left[\left(\frac{h_{F_2} S_{F_2} \mu_\beta}{f_{F_2}} + \frac{b}{a}\right)\left(\frac{F_{锭}}{f_{型}}\right)^a - \frac{b}{a} + m\right] \tag{8.5-7}$$

式中，σ_{MF_1}、σ_{MF_2} 为分别为相应于模子 F_1、F_2 区段上的金属流动应力；h_{F_1}、h_{F_2} 为分别为 F_1、F_2 区段上工作带长度；S_{F_1}、S_{F_2} 为分别为 F_1、F_2 区段上的型材之周长；f_{F_1}、f_{F_2} 为分别为 F_1、F_2 区段上型材之面积。



为了保证型材各区段上金属质点的流动速度均等，则各相应部分流动应力也要均等，即：

$$\sigma_{MF_1} = \sigma_{MF_2} = \sigma_{MF_3} \quad (8.5\text{-}8)$$

将式（8.5-6)、式（8.5-7）代入式（8.5-8）后得：

$$\sigma_{S.T}\left[\left(\frac{h_{F_1} S_{F_1} \mu_\beta}{f_{F_1}} + \frac{b}{a}\right)\left(\frac{F_{锭}}{f_{型}}\right)^a - \frac{b}{a} + m\right]$$

$$= \sigma_{S.T}\left[\left(\frac{h_{F_2} S_{F_2} \mu_\beta}{f_{F_2}} + \frac{b}{a}\right)\left(\frac{F_{锭}}{f_{型}}\right)^a + \frac{b}{a} + m\right]$$

化简后得：

$$h_{F_2} = \frac{h_{F_1} S_{F_1} f_{F_2}}{S_{F_2} \cdot f_{F_1}} \quad (8.5\text{-}9)$$

这就是型材模孔工作带长度计算的一般公式，将式（8.5-9 移项后得：

$$\frac{h_{F_1}}{h_{F_2}} = \frac{f_{F_1}}{f_{F_2}} \times \frac{S_{F_2}}{S_{F_1}} \quad (8.5\text{-}10)$$

式（8.5-10）说明型材模孔各区段工作带长度与其面积成正比，与其周长成反比。面积之大小反映挤压时流经各区段之金属分配情况，周长之长短反映了摩擦力的分布，因此以上方法的本质就是根据金属量的分配与摩擦力的大小来均衡金属的流动速度。

当型材的宽度与型材的厚度之比（即宽厚比）小于 30 或者当型材的最大宽度小于挤压筒直径的 $\frac{1}{3}$ 时，使用上述公式是比较合理的，如图 8.5-3 所示。

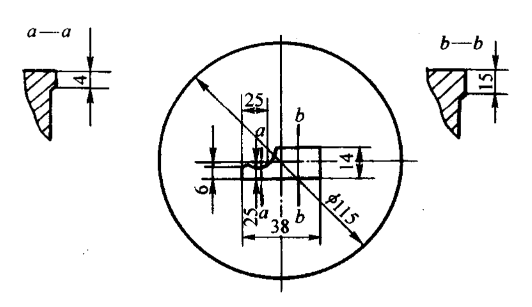


图 8.5-3　型材模孔工作带分布图
（挤压筒直径 ϕ115 mm）

当型材之宽厚比大于 30 或型材之最大宽度大于挤压筒直径的 $\frac{1}{3}$ 时，模孔工作带长度的计算方法除应考虑上述因素之外，尚须考虑型材区段距挤压筒中心距离，因为即使型材之厚度均匀时（金属量分配均等），挤压筒中心金属的流速也会大于边缘金属之流速。因此，模子中心区的工作带长度应加长，以增加阻碍。用圆挤压筒挤压宽厚比较大的板状型材或带筋壁板时，这种现象最明显，如图 8.5-4 所示。当用扁挤压筒挤压上述产品时，因流动情况有所改善，故工作带长度的变化亦不如圆挤压筒挤压时那么剧烈。

当型材对称性好而且比较简单，以及型材最大宽度小于挤压筒直径的 $\frac{1}{4}$ 时，模子工作带长度可采用更简单的公式计算（如图 8.5-5 所示）

$$\frac{h_{F_1}}{h_{F_2}} = \frac{H_{F_1}}{H_{F_2}} \quad (8.5\text{-}11)$$

式中，H_{F_1}、H_{F_2} 为 F_1、F_2 各区段上型材的厚度。

用上述公式计算型材模孔各区段的工作带长度时，应先给定一个区段之工作带长度值作为计算的参考值（一般给定型材厚度最窄区段上的最小工作带长度）。工作带最小长度

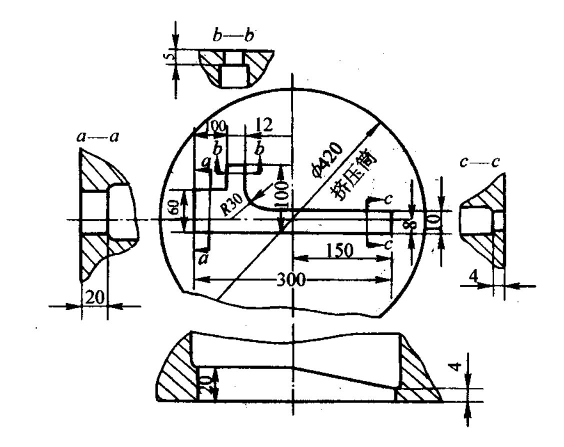


图 8.5-4　型材模孔工作带分布

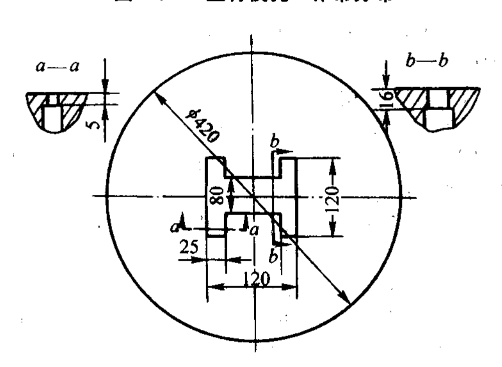


图 8.5-5　型材模孔工作带分布图
（挤压筒直径 ϕ420 mm）

应能保证模具有足够的耐磨能力和使用寿命，能使型材的外形尺寸和缘板厚度保持稳定。对于铝合金来说，在实际生产中，一般根据型材的规格和挤压机的吨位来确定工作带的最小长度，见表 8.5-1。

表 8.5-1　模孔工作带最小长度值

挤压机/MN	125	50	35	16.3 ~ 20	7.5 ~ 12.5
工作带最小长度/mm	5 ~ 10	4 ~ 8	3 ~ 6	2.5 ~ 5	1.5 ~ 3
模孔空刀尺寸/mm	3	2.5	2	1.5 ~ 2	0.5 ~ 1.5

工作带的最大长度按挤压时金属与模孔工作带之间最大有效接触长度来确定。当工作带长度超过某一数值时，由于金属流出模孔后的冷却收缩而脱离工作带的接触，此时工作带对于金属不再起阻碍作用。金属流动速度越快，铸锭与模子的加热温差越小，则工作带的最大有效长度也可越大。一般来说，型材模子工作带的最大长度不应超过 15 ~ 25 mm，生产实际中，对铝合金常用 8 ~ 15 mm。

应当指出，在导出上述公式时，假设挤压型材各个部位的挤压系数都相等，即等于总的挤压系数 $\lambda_{总} = \frac{F_{锭}}{F_{型}}$；而实际上，型材各个部位的挤压系数取决于模孔的配置，它们相互之间以及与总的挤压系数之间都可能存在很大的差别。

此外，即使型材缘板的厚度在整个宽度上是一致的，也不能按公式计算取一致的工作带长度，因为缘板中心区金属流动总是比边缘区快，而且缘板越宽其流动速度差别也就越大，因此在设计模子时，必须将沿缘板宽度方向上的工作带长度作成可变的。

1）当采用单孔模挤压时，可按单一同心圆规则来确定模孔工作带的长度，如图 8.5-6 所示。

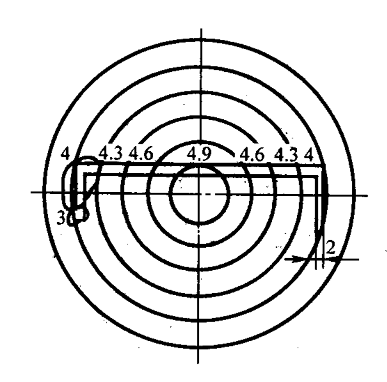


图 8.5-6 单孔模的同心圆规则

① 确定模孔工作带长度时，先以整个型材断面上金属最难流出处为基准点，该处的工作带长度一般为该处型材的1.5～2倍。

② 与基准点相邻区段的工作带长度可为基准点的工作带长度加上1 mm。

③ 当型材壁厚相同时，与模子中心（与挤压筒中心重合）距离相等处其工作带长度相同；由模子中心起，每相距10 mm（同心圆半径）工作带长度的增减数值可按表8.5-2所列数值进行确定。

④ 当型材壁厚不相同时，模孔工作带长度的确定除应遵循上述规则外，还应按前述的式（8.5-10）或式（8.5-11）进行计算，然后还需依靠设计者的经验进行恰当确定。

2）当采用多孔模挤压时，可按复合同心圆规则来确定各个模孔工作带的长度，如图8.5-7所示。

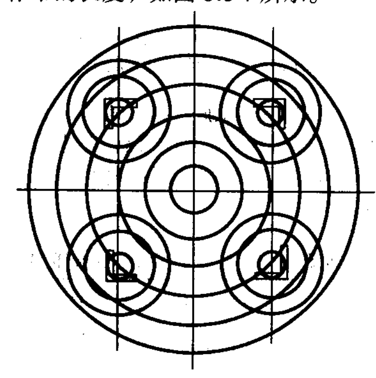


图 8.5-7 多孔模的复合同心圆规则

当型材壁厚相同时，对于整个模孔来说，由模子中心（型材重心不与模子中心重合）起，每相距10 mm（整个模子的同心圆半径），工作带长度的增减数值应按表8.5-2所列数值进行拟定，对于任一模孔来说，由模孔中心（型材重心坐标可由设计者确定，原则上可与模孔中心重合）起，每相距10 mm（任一模孔的同心圆半径），工作带的增减数值也应按表8.5-2所列数值进行拟定；最后将上述两种情况综合考虑，再依靠设计者的经验进行恰当确定。

表 8.5-2 模孔工作带长度增减值

型材断面壁厚/mm	每相距10 mm（同心圆半径），工作带长度增减值/mm
1.2	0.20
1.5	0.25
2.0	0.30
2.5	0.35
3.0	0.40

当型材壁厚不相同时，既要遵循上述复合同心圆规则，还应按前述的式（8.5-10）或式（8.5-11）进行计算。

对于以下几种情况，需酌情对模孔工作带长度进行必要的增减，如图8.5-8所示。

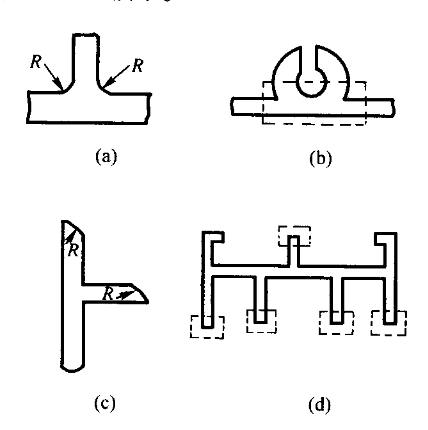


图 8.5-8 应酌情增减工作带长度的几种情况

① 交接圆边有凹弧 R（$R>1.5$ mm）者，工作带可加上1 mm，如图8.5-8a所示。

② 螺孔处工作带可加上1 mm，如图8.5-8b所示。

③ 交接圆边有凸弧 R（$R>1.5$ mm）者，工作带可减短1 mm，如图8.5-8c所示。

④ 壁厚相同的各个端部的工作带可减短1 mm，如图8.5-8d所示。

1.2 阻碍角的辅助作用

如上所述，用增加工作带长度的方法来调整金属流速，是有一定限度的。特别是在设计缘板厚度差别很大的型材模子时，这种情况尤为明显。此时，为了获得均匀的流速，可在厚壁处采用阻碍角的方法来加以补充阻碍。

研究与实践证明，模孔的入口锥角与挤压力的大小有关，如图8.5-9所示，当模孔入口锥角小于15°时，挤压力急剧增高，甚至比平面模的挤压力还要大。根据这个规律，在平面模模孔处制做小于15°的入口锥角就能起到阻碍金属流动的作用，这个入口锥角（实质上是型材模孔工作带母线与挤压中心线之间的夹角）就叫阻碍角，见图8.5-10。

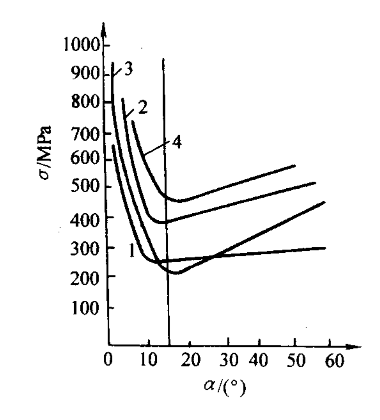


图 8.5-9 单位挤压力与模孔入口锥角的关系曲线

1—纯铝，$\lambda=4$；2—镁合金，$\lambda=2$；
3—2A11，$\lambda=2$；4—5A05，$\lambda=2$

确定模孔阻碍角的方法，又叫补充应力法。任何两区段的流动应力之差叫做补充应力。是用比较型材各区段上金属流动应力之大小来求得的。

型材各区段上的补充应力由下式确定：

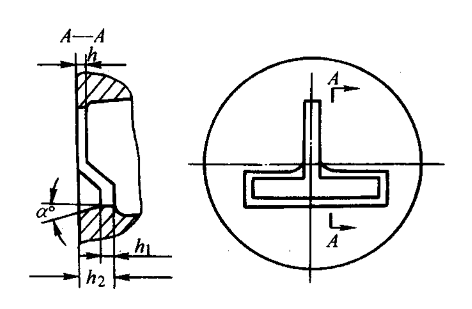


图 8.5-10　带有阻碍角的模子

$$\sigma_{M补}=\sigma_{MF_1}-\sigma_{MF_2}=\cdots=\left(\frac{h_{F_2}S_{F_1}}{f_{F_1}}-\frac{h'_{F_2}S_{F_2}}{f_{F_2}}\right)\times\sigma_{S\cdot T}\left(\frac{F_{锭}}{f_{型}}\right)^a \quad (8.5\text{-}12)$$

式中，$\sigma_{M补}$为补充应力，MPa；$h'_{F_2}=h_{F_2}-(0.5\sim1)$，mm。

根据补充应力，由下式确定阻碍角：

$$\tan\alpha=\frac{3\sqrt{3}\sigma_{M补}-2\mu_\beta\sigma_{S\cdot T}}{6\sigma_{S\cdot T}} \quad (8.5\text{-}13)$$

式中，α 为阻碍角。

式 8.5-12、式 8.5-13 中的其他符号定义与式（8.5-7）相同。

用平面模挤压型材时，阻碍角一般不大于 15°，而以 3°～10°最为有效，图 8.5-11 示出了大梁型材模模孔加阻碍角的例子。在挤压某些类型的型材时，由于模子的弹性挠曲，在设计模子时采用 1°或 1°以下的阻碍角，以进行自身补偿，这样可有效地利用工作带长度，如图 8.5-12 所示。图 8.5-13 示出了几种带有阻碍角的型材模子。

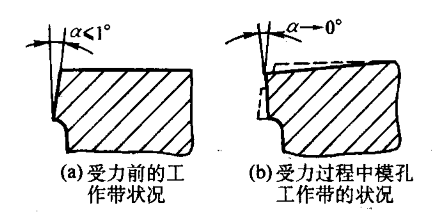


图 8.5-11　带有阻碍角的大梁型材模

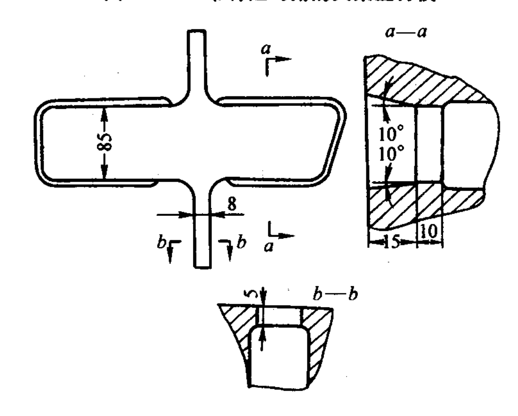


图 8.5-12　加阻碍角来补偿模子弯曲的示意图

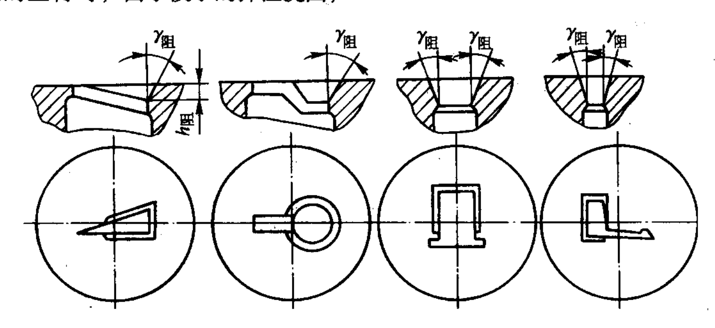


图 8.5-13　带有阻碍角的型材模子举例

1.3　采用促流角来均衡金属流速

在挤压各部分壁厚差异很大的难挤压型材时，为了减少金属流速的不均匀性，可在阻碍力大，难变形的薄壁部分做一能有助于金属流动的所谓促流角 γ，则可以使金属向薄壁部分流动。如图 8.5-14 所示。当加有促流角时，单位挤压力 dN 的水平分力 dx 将促使金属向阻力大的右边流动。

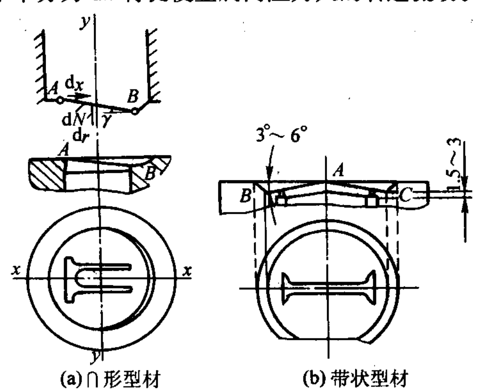


图 8.5-14　用促流角控制金属的流速

促流角的大小根据型材断面及形状特点来确定，一般取 3°～10°，如图 8.5-15 所示。图 8.5-16 示出了几种带有促流角的型材模具图。

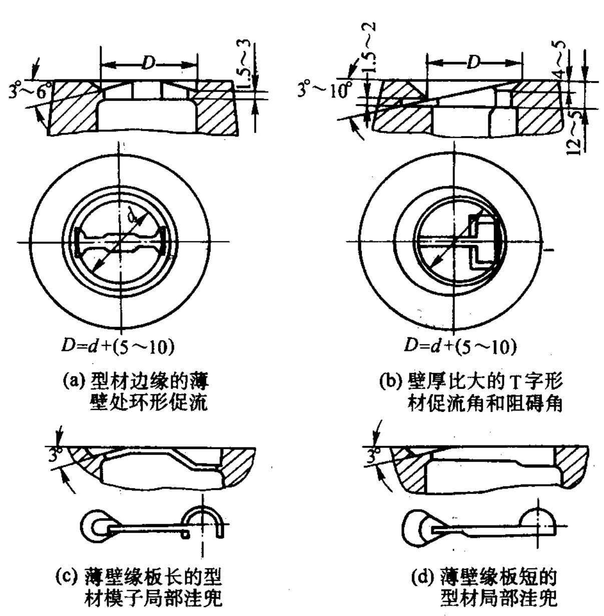


图 8.5-15　常见的带有促流角模子



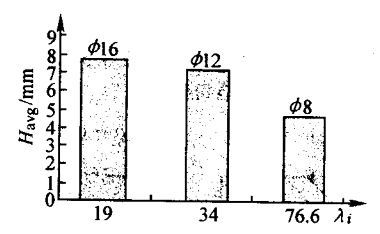


图 8.5-16 局部挤压比 λ_1 与挤压试件平均高度的关系

1.4 使型材各部分流动速度均匀的其他方法

（1）平衡孔法

在挤压形状特别复杂而在模子上只能布置一个模孔的型材时，为了均衡流速，保证制品尺寸、形状的准确性，或为了减少挤压系数，可以在模子平面的适当位置附加一个或两个平衡模孔，如图 8.5-17 所示。但这并不是理想的方法，因为会降低产品的成品率，有时还可能擦伤制品表面。

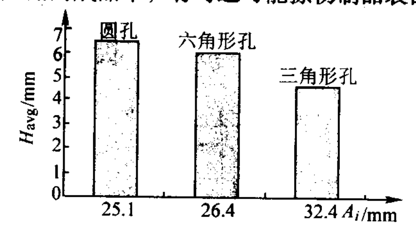


图 8.5-17 挤压带面积 A_1 与挤压试件平均高度关系

（2）采用工艺余量或附加筋条的方法

在挤压宽厚比很大，形状极其复杂，或各部分壁厚相差悬殊，对称性很差的型材时，为了均衡金属的流速，可在适当的部位，以工艺余量的形式附加筋条或增大壁厚等，待制品挤出后用机械加工或化学铣削的方法铣掉，如图 8.5-18 所示。

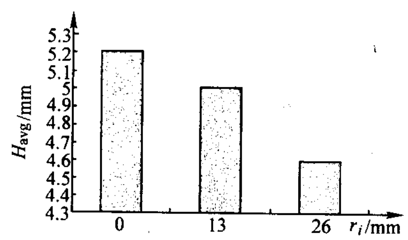


图 8.5-18 模孔距离 r_1 与挤压试件平均高度的关系

（3）多孔对称布置模孔

如前所述，用多孔中心对称布置模孔是解决形状极其复杂，对称性极差的型材的金属流速问题的最有效的可靠办法之一。

2 现代优化设计方法中的两个关键问题

2.1 目标参数的确定

根据里奇门德等人的研究，单位挤压力能耗量、模具使用寿命及制品组织性能等与挤压模具的轮廓曲线形状、半模角大小、模具的轴向长度（包括工作带宽度）等结构因素有关，因为它们直接影响变形金属的流动分布和应力-应变状态，影响摩擦力的大小。生产实践证明，大的摩擦阻力、严重的应力及流动不均匀分布是导致单位挤压力高、模具容易破裂、磨损及制品产生弯曲、扭拧、波浪、内应力、低力学性能的重要原因。因此，优化挤压模具就是优化模具的轮廓曲线、半模角和模具的轴向长度，使模具具有最长的使用寿命，所需的力-能消耗最小，生产效率最高，制品的组织和性能最好，成本最低而效益最高。可见，挤压模具的优化是个多目标优化问题。写出这些多目标函数是困难的，甚至是不可能的，但可用一些参数来代替，称这些参数为目标参数。

研究和生产实践表明，挤压模具的失效与报废大多是由于磨损、开裂、尺寸超差、塌腔等造成的，而这些现象都与挤压力（包括摩擦力）过大有关。因此，挤压力可作为模具优化的一个目标参数，应选择使挤压力最小的模具模腔轮廓曲线和半模角。

制品组织和力学性能的好坏，可用其横断面上各点处的等效应变率及其梯度来衡量，梯度越小意味着变形愈均匀，组织愈均匀，力学性能愈好。因此，等效应变率及其梯度可作为模具优化的另一个目标参数，应选择使等效应变率梯度值小的模腔轮廓曲线和半模角。

桑普尔和拉利提出用显微硬度表征铝合金型材的力学性能。显微硬度高，则力学性能好，他们还给出了显微硬度与应变率的关系式。因此，显微硬度也可作为模具优化的目标参数，应选择使显微硬度高的模腔轮廓曲线和半模角。

提高挤压速度能提高生产率，但会升高挤压力，影响模具寿命，还可能增大制品组织不均匀性，因此应选择适当的挤压速度。挤压速度也可作为模具优化的一个目标参数。

综上所述，在一般情况下，可确定挤压力；等效应变率及其梯度；显微硬度；挤压速度作为挤压模具优化设计的四个目标参数。

2.2 约束条件的确定

对于铝合金挤压来说，模具优化设计采用以下两个约束条件：

1）受工模具系统的强度、刚度、失稳条件的约束。挤压筒、挤压轴、穿孔针等工具的强度、刚度和失稳条件在挤压机设计时已得到确认。模具的强度、刚度与失稳条件除了在设计挤压机时应加以考虑外，还与挤压工艺条件、产品形状与规格、产品和模具的材质等有关。

2）受产品表面状态的约束。在设计模具时应保证金属流动时有一定的死区存在，以防止变形金属中的杂质、油污、脏物流入制品中。

为了实现上述优化目标，可预设计多种模腔轮廓曲线和半模角，然后用最有效的方法（如工程法、滑移线法、上限法、有限元法、云纹法、光弹光塑法等等）计算工件有各种模腔和半模角的模子中挤压的应力-应变场、温度-速度场以及其他有关参数。根据试验研究和分析计算结果择优选择模腔轮廓曲线和半模角，在此基础上再采用 CAD/CAM 技术最后完成模具的设计。

3 型材挤压模工作带长度设计计算的数学建模

在型材挤压生产中，工作带长度设计是铝型材挤压模模孔最主要的几何参数之一，它直接影响着挤压制品尺寸精度、表面质量、几何形状。若设计不当，会造成金属流出模孔的速度不均，从而引起型材的歪扭、弯曲、波浪、裂纹等缺陷，造成反复修模甚至模具报废，从而影响挤压产品成本和质量。目前，设计工作带长度的方法主要是根据古布金关于挤压力计算公式的演变形式，假设压力均匀分布，从而推导出型材模模孔工作带长度计算公式。由于没有考虑模孔位置对金属流动的影响，用该方法设计工作带长度往往不能很好平衡金属的流动。

采用有限变形弹塑性有限元，以 ANSYS 软件及其二次开发为平台，采用 APDL 编程技术，研究了局部挤压比、挤压带面积和模孔距离等主要模具结构参数对挤压流动速度的影响规律。根据型材挤压过程的流动规律，综合了主要模具



结构参数对金属流动速度的影响，建立了型材挤压模孔工作带长度设计计算的数学模型。

3.1 型材挤压时金属流动规律研究

(1) 局部挤压比对金属流动速度的影响

为了反映挤压力大小对金属流动速度的影响，定义挤压筒面积与局部模孔面积之比为局部挤压比，以 λ_i 表示：

$$\lambda_i = F/F_i \tag{8.5-14}$$

式中，F 为挤压筒面积；F_i 为局部模孔横截面面积。

在距挤压筒中心等距离处，分别开设直径为 $\phi8$、$\phi12$、$\phi16$ 不同的圆孔，采用有限元技术对挤压过程进行了数值仿真。由图 8.5-16 的仿真结果可知，从 $\phi16$ 圆孔中挤出的棒料长度大于从 $\phi12$ 圆孔中挤出的棒料长度，从 $\phi12$ 圆孔中挤出的棒料长度大于从 $\phi8$ 圆孔中挤出的棒料长度。表明，局部挤压比愈小，金属流动速度愈大。

(2) 挤压带面积对金属流动速度的影响

为了反映摩擦力大小对金属流动速度的影响，定义局部模孔周长与该处模孔工作带长度之积为挤压带面积：

$$A_i = C_i \times L_i \tag{8.5-15}$$

式中，A_i 为挤压带面积；C_i 为局部模孔周长；L_i 为局部模孔工作带长度。

在距挤压筒中心等距离处，分别开设面积相等但周长不相等的圆孔、六角形孔和三角形孔，且各模孔挤压工作带长度相同，对其挤压过程进行了有限元仿真。由图 8.5-17 的仿真结果可知，从圆模孔中挤出的棒料长度大于六角形模孔中挤出的棒料长度，从六角形模孔中挤出的棒料长度大于三角形模孔中挤出的棒料长度。因圆模孔周长最小，六角形模孔周长次之，三角形模孔周长最大，即圆模孔挤压带面积小于六角形模孔挤压带面积和三角形模孔挤压带面积。所以，挤压带面积愈小，金属流动速度愈大。

(3) 模孔距离对金属流动速度的影响

为了反映模孔与挤压筒中心相对距离对金属流动速度的影响，定义模孔距挤压筒中心相对距离为模孔距离 r_i。沿着横轴方向上开设等距离的 5 个小圆孔，对其挤压过程进行了有限元仿真。由图 8.5-18 的仿真结果可知，离挤压筒中心远的模孔中挤出的棒料长度小于离挤压筒中心近的模孔中挤出的棒料长度。也就是说，模孔离挤压筒中心愈近，金属流动速度愈大。

3.2 挤压模工作带长度设计计算的数学建模

(1) 影响金属流速的主要模具结构参数

根据上节对型材挤压过程的有限元仿真研究，获得了主要模具结构参数对金属流动速度影响的规律：

1) 模孔局部挤压比（$\lambda_i = F/F_i$）愈小，金属流动速度 v_i 愈大。

2) 模孔挤压带面积（$A_i = C_iL_i$）愈小，金属流动速度 v_i 愈大。

3) 模孔距离 r_i 愈小（即模孔离挤压筒中心愈近），金属流动速度 v_i 愈大。

(2) 工作带长度设计计算的数学模型

根据以上挤压流动变形规律，可知任一模孔单元的流出速度 v_i 是有关局部挤压比 λ_i、挤压带面积 A_i 和模孔距离 r_i 的函数。可表述为：

$$v_i = f(\lambda_i, A_i, r_i) \tag{8.5-16}$$

设函数 f 具有下述形式

$$v_i = k\frac{1}{\lambda_i^{n_1}}\frac{1}{A_i^{n_2}}\frac{1}{r_i^{n_3}} \tag{8.5-17}$$

且 $n_1>0$，$n_2>0$，$n_3>0$。通过总结生产实践经验，取 $n_1=1$，$n_2=1$，$n_3=1/3$，则式（8.5-17）变成

$$v_i = k\frac{F_i}{F}\frac{1}{C_iL_i}\frac{1}{r_i^{1/3}} \tag{8.5-18}$$

式中，v_i 为模孔单元 i 处的金属流速；k 为比例系数；L_i 为模孔单元 i 处的工作带长度；C_i 为模孔单元 i 处的周长；r_i 为模孔单元 i 与挤压筒中心之间的距离；F 为挤压筒面积；F_i 为局部型孔横截面积。

选择一基准单元，给定该单元的模孔工作带长度 L_0，则

$$v_0 = k\frac{F_0}{F}\frac{1}{C_0L_0}\frac{1}{r_0^{1/3}} \tag{8.5-19}$$

由式（8.5-18）、式（8.5-19）可得：

$$\frac{v_i}{v_0} = \frac{F_iC_0L_0r_0^{1/3}}{F_0C_iL_ir_i^{1/3}} \tag{8.5-20}$$

当型材各部分从模孔平流挤出时应有

$$\frac{v_i}{v_0} = 1 \tag{8.5-21}$$

故有

$$L_i = \frac{F_iC_0L_0r_0^{1/3}}{F_0C_ir_i^{1/3}} \tag{8.5-22}$$

(3) 工作带长度设计计算步骤

1) 将铝型材的横截面划分成若干比较简单的模孔单元（如图 8.5-19b 所示）。

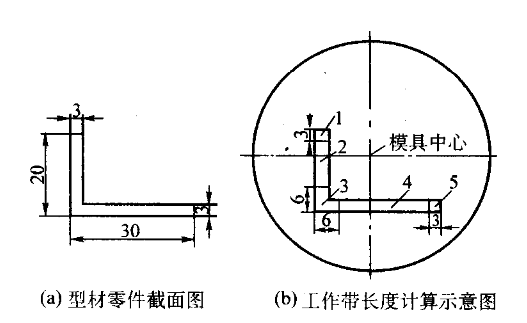


图 8.5-19　型材零件挤压模模孔工作带长度设计计算图
1～5—单元代号

2) 计算每个模孔单元的面积 F_i。

3) 计算每个模孔单元与工作带接触部分的周长 C_i。

4) 计算每个模孔单元的形心到挤压筒中心的距离 r_i。

5) 给定某模孔单元 i 处的工作带长度作为基准单元。一般给定模孔开口最小离挤压筒中心最远处（如图 8.5-19b 中单元 5）的最小工作带长度 L_0（一般取为 2～5 mm），然后按式（8.5-22）即可计算出任一模孔单元 i 处的工作带长度。

6) 将长度有突变的工作带之间用倾斜直线代替。

在某些特殊情况下，要对由式（8.5-22）计算的工作带长度进行修正：

1) 型材螺孔处，工作带长度应增加 1 mm。

2) 型材两边交接处有过渡圆角 R 的地方，应适当增大工作长度，一般可取 1 mm。

3) 型材模孔端部，因三面受阻，金属流速较慢，故此处的工作带应减少 1 mm。

4) 在型材有圆头处，要适当增加相应的工作带长度，



一般可取 1 mm。

当工作带长度达到 8 ~15 mm 时，再增大数值其阻碍效果已不明显。原因是金属流出模孔后的冷却收缩而脱离工作带的接触。因此，当按式（8.5-22）计算出的 L 值超过 8 ~ 15 mm 时，可设计阻碍角以此来调整金属流速。

3.3 实验验证

如图 8.5-19 所示是某南方型材挤压厂角铝型材实际产品的横截面图。为了验证本文推导的型材挤压工作带长度设计式（8.5-22）的正确性，选择该型材零件按式（8.5-22）设计了挤压时的工作带长度。按图 8.5-19 所示将其划分为 5 个单元，按式（8.5-22）的要求计算单元 F_i、C_i、r_i，并填入表 8.5-3，其中选取 $L_5 = 4$ mm。

表 8.5-3 角铝型材挤压模孔工作带长度设计计算

	F_i/mm^2	C_i/mm	r_i/mm	L_i/mm	备　注
第一单元	9	9	22.19	4.4	模孔端部，L_1 减 1 mm，$L_1 = 3.4$ mm
第二单元	33	22	26.45	6.2	
第三单元	27	18	32.75	5.8	
第四单元	63	42	28.59	6.1	
第五单元	9	9	29.38	4.0	模孔端部，L_5 减 1 mm，$L_5 = 3$ mm

经现场试验，一次试模成功，所挤出的型材完全满足形状尺寸及表面质量的要求。表明模具设计是正确的。同时与有关文献中的实例进行比较验证，结果基本吻合。该公式可用于铝型材挤压模模孔工作带长度设计计算。

4 U 形铝型材挤压模具结构工艺参数优化设计

挤压工具可分为大型基本工具和模具，大型基本工具包括挤压筒、挤压轴、针支承、支承环、压型嘴和模架等，模具包括模子、穿孔针等直接参与金属变形且消耗比较大的工具。普通型材模具装配示意图如图 8.5-20 所示。

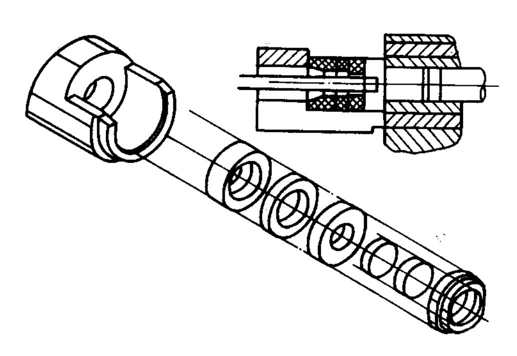


图 8.5-20 型材模具装配示意图

铝型材挤压模具设计是一项复杂的、综合分析的、反复进行的工作，由于铝件挤压的单位压力较低，所以铝件挤压的主要问题不是模具强度问题，而是挤压件的质量问题，模具的结构尤其是模孔的位置、形状和大小对铝挤压产品的质量影响很大。铝型材挤压产品的质量指标主要表现为组织均匀、合理的金属流动速度、开裂机会小等。由于型材的挤压断面形状比较复杂，坯料与挤压制品在形状上缺乏几何相似性，并且坯料与挤压筒之间存在剧烈摩擦，这样使得材料流动极不均匀，而金属流出模孔的速度不均匀，往往会造成型材的扭拧、波浪、弯曲及裂纹等缺陷。影响型材挤压过程金属流动的因素有：金属材料的性能、挤压方法、摩擦润滑条件、模具与铸锭的加热温度、模具的结构与形状、变形程度等等，其中合理调整金属流速的方法主要是模子平面上合理的布置模孔。因此为了获得高品质的型材产品，设计型材挤压模具时，除了要选择强度足够的模具结构、良好的模具制造精度外，必须要考虑挤压模具模子平面上模孔的合理布置，以保证型材挤压断面的各个部分流速均匀。

根据前面提出的集数值模拟、人工神经网络和遗传算法于一体的挤压模具优化设计模型，本节以 U 形铝型材挤压模具为研究对象，通过建立三层 BP 神经网络模型，采用有限元计算机模拟获得神经网络的样本信号，对神经网络模型进行训练。为了提高型材挤压产品的质量，以型材在挤压工作带出口处具有最均衡的轴向挤压速度为目标，以模孔位置参数为设计变量，利用训练好的神经网络来预测目标函数的值，采用多种群并行遗传算法作为优化算法，对 U 形铝型材挤压模具进行了优化设计，得到了最佳的模孔配置参数。并采用模拟仿真对优化结果进行验证，表明优化结果是有效的。

4.1 U 形型材挤压模具结构优化设计数学模型的建立

（1）目标函数的确定

挤压产品质量主要与挤压成形时的应变梯度（最大应变与最小应变之差）、材料损伤值、流速的均衡性等有关。本章以型材在挤压工作带出口处具有最均衡的轴向挤压速度为目标，采用金属挤出工作带时各节点挤出速度差异最小为目标函数。其表达式如下：

$$\min DMV = \frac{\sum_{i=1}^{N} |V_i - V_{ave}|}{N}$$

式中，N 为考虑区域的节点数目；V_i 为规定平面上的节点轴向速度；V_{ave} 为规定平面上平均轴向速度。

（2）设计变量的选择

对于不同的成形工艺，确定的工艺参数个数也不相同。在型材挤压过程中，要找到在保证模具强度前提下获得最佳的金属流动均衡性的合理模孔配置。图 8.5-21 为 U 形型材模孔位置方案图，由于该零件对称于 y 轴，优化设计时应考虑模孔位置参数 A 对金属流动均衡性的影响，即以 A 为优化变量，A 的取值范围通常为：$A =（0.2 \sim 0.5）B$，B 为 U 形型材的高度，本文中 $B = 30$ mm，因此，上述优化模型的优化变量取值范围为：$A = 6 \sim 15$（mm）。

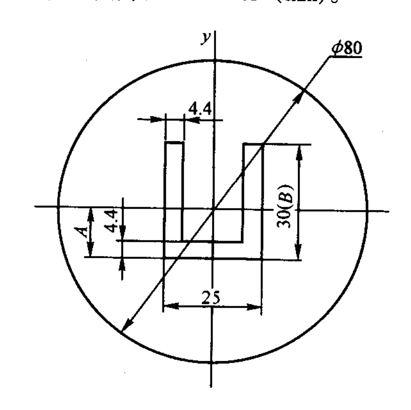


图 8.5-21 槽形型材模孔位置方案图

4.2 U 形型材挤压过程的有限元模拟

型材挤压成形属于三维体积非稳态变形过程。在变形过

程中，既存在几何非线性，又绊有材料和边界非线性，变形机制非常复杂。本节采用三维有限元模拟获得型材挤压过程中金属变形流动规律和应力应变特性，得到目标函数有限元值作为神经网络的样本信号，减少了试模时间。采用 UG 建模，有限元模拟软件 DEFORM3D 对 U 形铝型材进行三维刚塑性有限元模拟。

有限元模拟的挤压参数和材料属性如表 8.5-4 所示。其流动应力（N/mm²）– 应变关系为：

$$\bar{\sigma} = 209(\bar{\varepsilon})^{0.122}$$

表 8.5-4　有限元模拟的挤压参数和材料属性

坯料材料	A16062
坯料高度/mm	40
挤压筒直径/mm	80
工作带长度/mm	4
摩擦系数	0.25
挤压速度/m·s⁻¹	0.025 4
挤压比	15.1

采用四面体单元离散化后的初始坯料网格划分。初始坯料离散节点数为 3 234，单元数为 14 028。取 A = 7 mm、9 mm、11 mm、12 mm、13 mm、15 mm 进行三维刚粘塑性有限元模拟。根据不同模孔位置的刚塑性有限元三维模拟结果，我们可以看出合理模孔位置的趋势，在 U 形铝型材挤压过程中，模孔的位置布置是影响轴向挤压速度均衡性的重要因素，必须对其进行优化设计，得出最优的模孔位置参数。在挤出工作带出口时其对应的轴向速度分布图如图 8.5-22 所示。

通过刚粘塑性有限元分析计算得到的目标函数值如表 8.5-5 所示。这些目标函数值将作为人工神经网络的学习样本信号。

4.3　神经网络模型的建立与训练

BP 神经网络是目前应用最广、运行机制最易理解、研究最深入的一种人工神经网络，在金属成形技术中已有成功的应用。理论上早已证明：具有偏差和至少一个 S 型隐含层加上一个线性输出层的网络，能够逼近任何有理函数。经过反复试验，选用三层 BP 神经网络，利用神经网络的函数逼近功能，采用有限元模拟分析计算得到的目标函数值作为学习样本进行训练，训练后的神经网络可作为知识源来获得遗传算法所需要的目标函数值。其神经网络模型为：输入层：1 个神经元即模孔位置参数；隐含层：15 个神经元；输出层：1 个神经元即目标函数值。输入层与隐含层采用 log *sig* 函数连接，隐含层与输出层采用纯线性 *purlin* 函数连接。对已建立的网络模型进行神经网络训练，设定最小期望误差值 *err* _ *goal* = 0.001；设定最大循环次数 max _ *epoch* = 35 000；设定修正权值的学习速率 *lr* = 0.01；结合有限元分析的神经网络训练过程如图 8.5-23 所示：

经过 13 587 次训练，权值修正后的误差平方和 SSE = 9.721 82e – 004。训练结束。通过对训练好的神经网络进行仿真，得到的目标函数值结果见表 8.5-6。

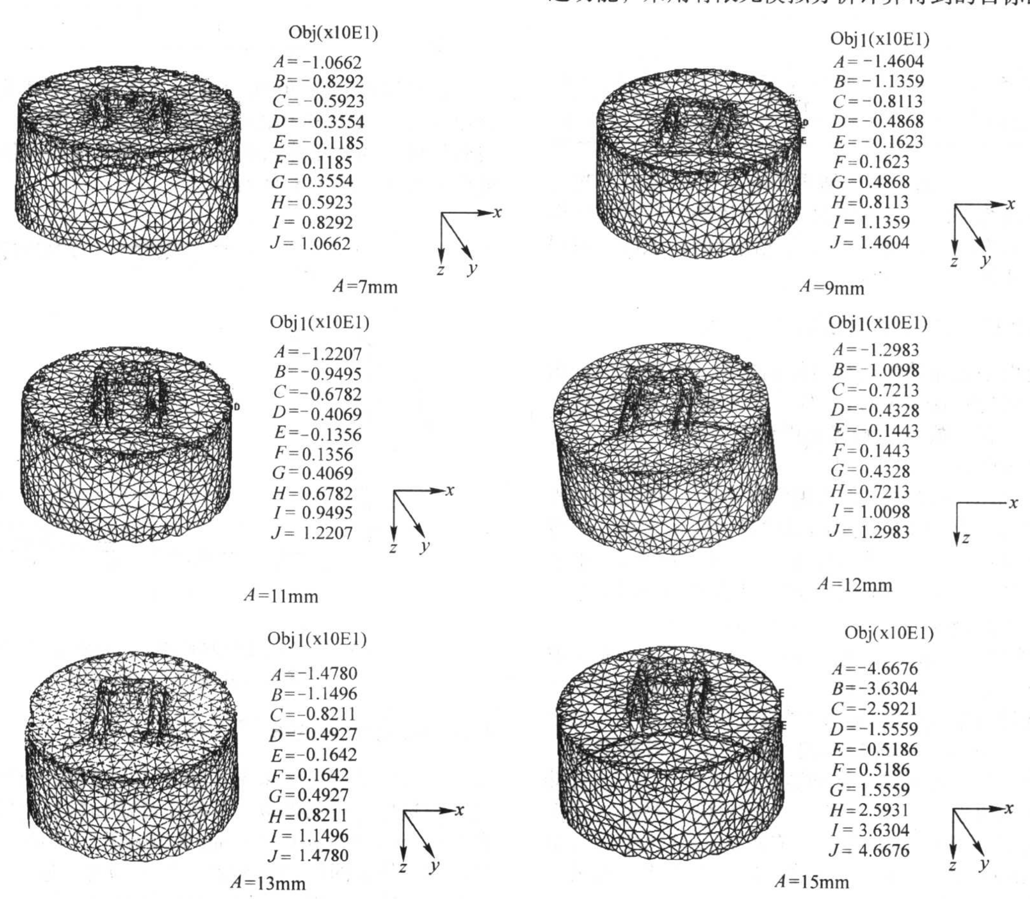


图 8.5-22　几种模孔位置参数的轴向速度分布图

表 8.5-5　设计变量与目标函数的对应关系

编　号	1	2	3	4	5	6
A/mm	7	9	11	12	13	15
DMV(计算)	0.321 3	0.303 6	0.293 4	0.276 6	0.281 2	0.293 1

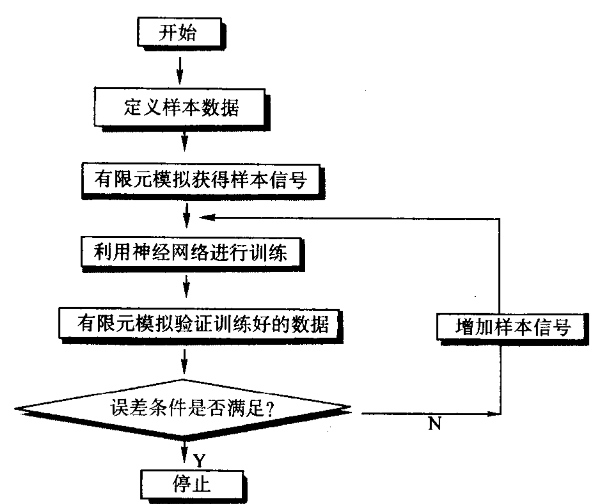


图 8.5-23 结合有限元模拟的神经网络训练过程

表 8.5-6 神经网络预测值与有限元计算值的比较

编 号	1	2	3	4	5	6
A/mm	7.3	9.8	11.4	12.5	13.6	14.8
DMV(计算)	0.315 6	0.294 6	0.289 6	0.275 9	0.288 6	0.291 9
DMV(预测)	0.314 9	0.295 5	0.288 3	0.275 4	0.286 7	0.292 3

从表 8.5-6 可以看出，预测结果与有限元计算结果吻合较好。这说明训练好的神经网络对于预测该特定问题的目标函数具有良好的推广性，可以作为优化设计的知识源来获得遗传算法所需要的目标函数值。

4.4 采用 RPGA 为优化算法的优化步骤

利用神经网络预测功能获得目标函数值，采用前面提出的多种群并行遗传算法（RPGA）对 U 形型材挤压模具模子平面上的模孔位置参数 A 进行优化设计。

优化设计步骤如下：

1）设计变量的编码方式。采用实数编码，避免利用神经网络预测时的解码和译码。本问题的设计变量为模孔位置参数 A，设计变量的上、下限为：$6\ \mathrm{mm} < A < 15\ \mathrm{mm}$。由于设计变量的个数为一个，则设计变量与基因链结构对的对应关系为：$x_j = g[j].gene[\,]^*(15-6)+6, (j=0,1,\Lambda,n)$

2）个体适应值函数：$F(X)=1/(f(X)+c)$，c 取足够小的正数，本问题取 $c=0.000\ 01$。$f(X)$为目标函数值，个体根据设计变量与基因链结构对的对应关系转化为相应的设计变量 A 值，由训练好的神经网络模型预测获得对应个体的目标函数值。对于预测的目标函数值出现小于 0 时，直接给一个极小的适应度值，令 $F(X)=0.000\ 001$。对每一个个体作出评价的评价准则为：适应度值越大，设计变量向量 X^j 越优越（HIGH _ IS _ BEST）。适应度值尺度变换计算采用线性比例方法。

3）采用可行域内随机取样机制产生 n 个个体。全部个体进行适应值计算排序，最好个体直接进入第一代交配池，其余的采用赌盘轮算法进行选择操作。

4）多种群的并行微观遗传算法实现步骤如前所述，遗传算法操作参数设定如下：种群规模取 50（并行遗传算法其子群体规模为 10）；交叉算子采用单点算术交叉，交叉概率 0.9；变异算子采用高斯变异，变异概率 0.01；最大遗传代数 50 代；个体替换百分比 25%；并行遗传算法取交换频率为 3；移民数目为最好的 5 个个体；子群体之间通讯拓扑关系为环状结构；子群体数目为 5。

5）迭代终止，获得的最好个体即为具有最优解，转化后的设计变量值即为最佳模孔位置。

多种群并行遗传算法（RPGA）随机运行 10 次运行最佳个体的各项相应数据如表 8.5-7。

表 8.5-7 多种群并行遗传算法的数据

次 序	最佳个体基因链	相应的设计变量 A/mm	最佳个体评价值 F（X）	最小目标函数值 DMV
1	{0.702 103}	12.32	3.638 149 6	0.274 865
2	{0.706 832}	12.36	3.583 677 1	0.279 043
3	{0.697 841}	12.28	3.641 952 3	0.274 578
4	{0.700 001}	12.30	3.648 263 6	0.274 103
5	{0.700 347}	12.30	3.646 121 9	0.274 264
6	{0.693 298}	12.24	3.587 250 9	0.278 765
7	{0.545 694}	10.91	3.437 442 0	0.290 914
8	{0.700 986}	12.31	3.641 541 2	0.274 609
9	{0.766 743}	12.9	3.472 704 5	0.287 986
10	{0.70 5687}	12.35	3.636 337 2	0.275 002

优化算法运行 10 次，得到的优化最佳模孔位置为：$A=12.3$ mm，此时个体的目标函数值为 0.274 1。该问题成功找到最优解的优化算法收敛过程中最大适应度值和平均适应度值示意图如图 8.5-24 所示。

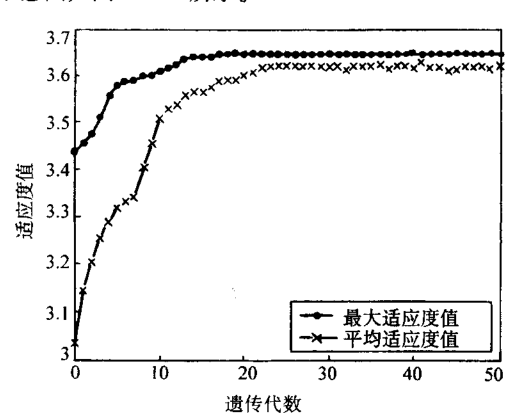


图 8.5-24 并行遗传算法收敛过程中最大适应度值和平均适应度值的比较

4.5 优化结果的有限元仿真

对获得的优化结果再次采用 UG 建模，DEFORM3D 进行三维刚塑性有限元模拟，其挤压参数和材料属性同前。经过有限元分析的取 $A=12.3$ mm 时其计算的 $DMV=0.273\ 4$，结果证明了神经网络的有效性，较为理想。通过与 $A=12$ mm 相对比，我们发现优化后的挤压模具更有利于金属流动，具有更均匀的应力、应变分布。

通过图 8.5-25 ~ 图 8.5-27 速度分布图，我们很清楚地看到优化的模孔位置具有更均衡的金属流动性，更利于金属沿 z 轴方向流动。

我们从图 8.5-28 可以看到，优化后得到的等效应力分布更均衡，通过模拟，我们得出 $A=12$ mm 坯料底部的最危险点应力为 329.97 MPa，$A=12.3$ mm 坯料底部的最危险点处应力为 295.05 MPa，可见，优化后坯料最大危险点应力有所降低（降低了 10.5%），这是相对于 $A=12$ mm 时的比较，相对于其他的模孔位置，优化效果更明显。



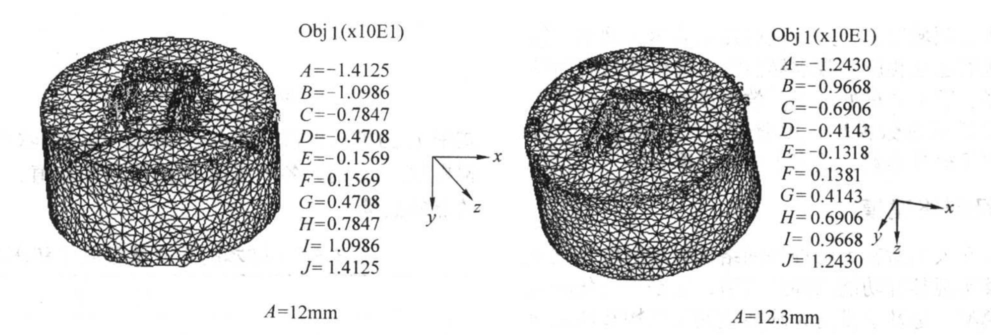


图 8.5-25　两种模孔位置的 *X*/*r* 方向的速度分布图（同下压量）

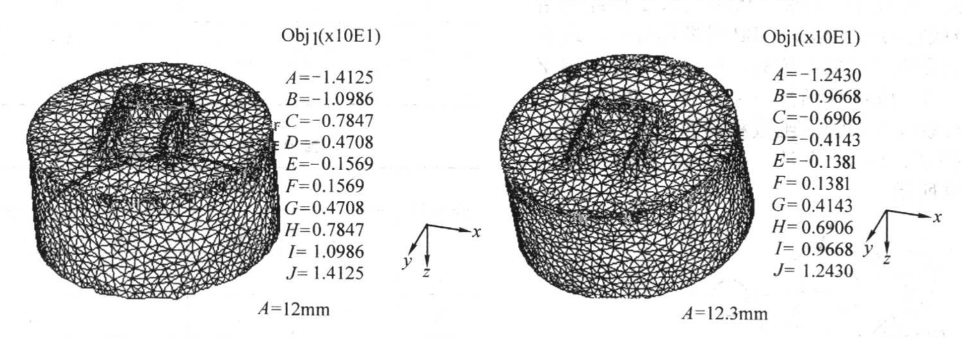


图 8.5-26　两种模孔位置的 *Y*/*z* 方向的速度分布图（同下压量）

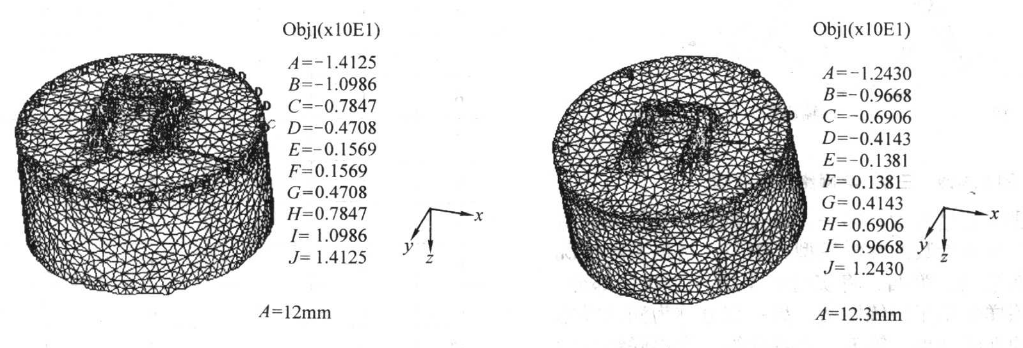


图 8.5-27　两种模孔位置的 *z* 方向的速度分布图（同下压量）

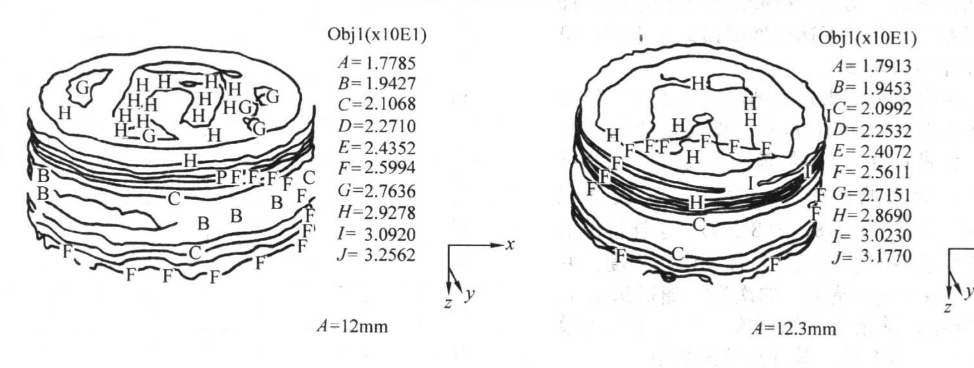


图 8.5-28　两种模孔位置的等效应力分布图（同下压量）

5　三维铝型材挤压模多参数优化

在铝型材挤压中，模具起着至关重要的作用，直接决定着产品的形状、尺寸精度、表面质量和强度。金属流速的合理调整是制约型材挤出质量的关键因素，因此挤压模的设计原则是有利于金属预分配和金属流速的调整，即希望模孔出口处各点的流速尽可能均匀。合理设计模孔工作带的长度、模孔布置、导流组合模导流腔的形状和尺寸，分流模分流孔、分流桥、焊合室形状和尺寸等模具参数是调整金属流速的有效手段。在模孔工作带设计方面，主要用古布金公式和修正公式得到。导流组合模的实质是型材模前面增放一个导料模，其形状为与型材相似的坯料，然后再进行第二次变形，挤出各种截面形状的型材[2,3]。其中导流腔的设计主要依靠在实验和数学基础上提出的数种公式。这些经验设计准则和计算模型对模具设计和生产有很大促进作用，但设计时完全取决于设计者的经验，由此所得的模具往往须经过多次试挤和修模才能调整出合适的模具参数，效率很低。因此需要建立模具参数和出口处各点流速均匀度之间的关系，但其中的关系很复杂无法建立明确的数学公式。人工神经网络抛开了传统的建模方法，它可以从大量的离散实验数据中经过

学习训练，提取其领域知识，并将这些知识表示为网络联结权值的大小，从而建立相应的数学模型[4]。遗传算法有简单通用、鲁棒性强、适于并行处理及高效等显著特点。利用人工神经网络建立模具参数模型，用遗传算法对参数进行优化，较好的控制了模具参数，提高了生产效率。

5.1　人工神经网络建模

神经网络是在人类对其大脑神经网络认识理解的基础上人工构造的能够实现某种功能的神经网络，它是理论化的人脑神经的数学模型，是基于模仿大脑神经网络结构和功能而建立的一种信息处理系统。

在人工神经的实际应用中，80%～90%的人工神经网络模型是采用BP网络或它的变化形式，BP网络具有一层或多层隐含层，其激活数必须是处处可微的，所以它不能采用 Z 值型的阀值函数 {0，1} 或符号函数 {-1，1}，BP网络经常使用的是S型的对数或正切激活函数和线性函数，其算法被称为误差反向传播法，即BP算法，一种BP网络模型的拓扑结构如图8.5-29所示。

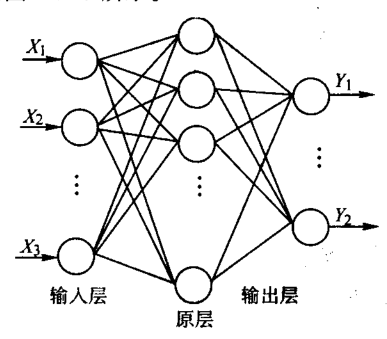


图8.5-29　三层BP网络拓扑结构

神经网络建模的过程为：第一，通过正交法获得实验样本；第二，建立模具参数的数学模型；第三，根据实际情况选择合适的网络结构；第四，将实验样本划分为两个部分，一部分称为训练样本用于训练网络，另一部分称为测试样本用于检测网络的训练结果；第五，训练网络，取得联结权值及阀值，即网络的知识参数；第六，检验网络是否收敛，即检验权值修订后的误差平方和是否达到期望误差最小值；第七，验证所确定的神经网络模型。

本文以一个导流组合模为例来建立神经网络模型，铝型材截面形状如图8.5-30所示（单位mm），需要优化的模具参数有：最短模孔工作带长度 l_{bmin}、导流腔深度 h_g、最小导流腔半宽 w_{gmin}、模孔型心偏移量 s_g。使用正交设计表 $L_{27}(3^{13})$ 来设计样本[7]（见表8.5-8，表8.5-9），这样得出的样本具有代表性，能反应各因子对优化目标的影响程度，并能大大减少软试模（Super forge模拟）的次数。随机选定1、9、18、27号为检验样本，其余为训练样本。优化目标为模孔出口处流速均方差—— SDV 值，其计算公式如下：

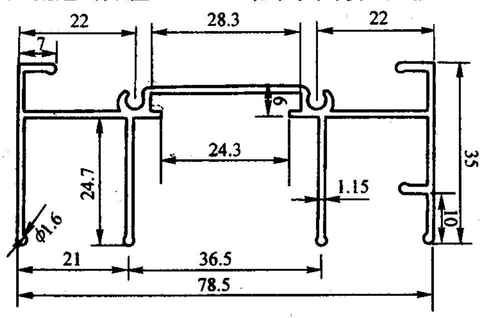


图8.5-30　铝型材截面图

$$SDV = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^{N} v_i - v_{ave}\right)^2}{N}}$$

式中 v_i 为模孔出口处各点的流速，其值由软件SuperForge模拟提取。v_{ave} 则为各点流速 v_i 的算术平均值，N 为随机选取的点的数量。

表8.5-8　样本的正交试验因子和水平表

水　平	因　　子			
	l_{bmin}	h_g	w_{gmin}	s_g
1	2	13	6	0
2	2.25	15	7.5	10
3	2.5	17	9	20

表8.5-9　样本的正交实验表

样本号	各因子所取水平				结果
	l_{bmin}	h_g	w_{gmin}	s_g	SDV
1	1	1	1	1	1.96
2	1	1	2	2	1.26
3	1	1	3	3	3.21
4	1	2	1	2	1.63
5	1	2	2	3	5.23
6	1	2	3	1	2.701
7	1	3	1	3	5.02
8	1	3	2	1	2.41
9	1	3	3	2	1.65
10	2	1	1	2	0.92
11	2	1	2	3	4.32
12	2	1	3	1	2.112
13	2	2	1	3	3.86
14	2	2	2	1	2.561
15	2	2	3	2	1.121
16	2	3	1	1	3.120
17	2	3	2	2	1.56
18	2	3	3	3	5.315
19	3	1	1	3	4.12
20	3	1	2	1	2.13
21	3	1	3	2	1.57
22	3	2	1	1	2.81
23	3	2	2	2	1.36
24	3	2	3	3	3.377
25	3	3	1	2	1.54
26	3	3	2	3	4.326
27	3	3	3	1	2.783

采用三层BP网络进行建模（根据BP定理），网络输入和输出层神经元数由实际参数确定，中间层神经元数由Kolmogorov定理和实际情况共同确定，最终确定神经网络结构

为4-12-1。利用MATLAB神经网络工具箱函数完成训练的过程，采用newff生成一个前馈BP网络，trainbpx（快速BP算法）训练网络，设定err _ goal（期望误差最小值）为10^{-4}。网络结构和函数可随时更改。当神经网络的SSE（权值修订后的误差平方和）达到err _ goal时如图8.5-31，训练结束。然后取1、9、18、27号检验样本来检验网络，结果吻合良好。

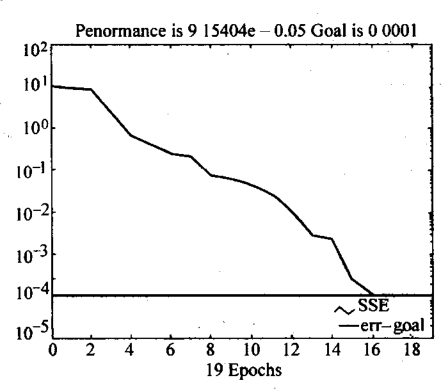


图8.5-31　网络误差平方和随训练步数变化的图

5.2　遗传算法优化

由神经网络建立的模具的数学模型，其性质十分复杂，而且不能写出明确的数学表达式，很难用传统的优化方法来求解。一种模仿生物自然进化过程的、被称为“进化算法（evolutionary algorithm）”的随机优化技术在解这类优化难题中显示出了优于传统算法的性能。遗传算法是今为止进化算法中应用最多、比较成熟、广为人知的算法。

遗传算法（GA）是一种有效地解决最优化问题的方法，是一种基于生物自然选择与遗传机理的随机搜索算法，与传统搜索算法不同，遗传算法的寻优过程是一个迭代的过程。把搜索空间映射为遗传空间，将参变量映射为染色体，向量的每个元素称为基因，所有染色体组成种群，并按规定的目标函数对每个染色体进行评价，根据结果给出一个适配值（fitness）。在这种机制下，每一代中各个体的基本特征可以通过染色体遗传到下一代中，在下一代中，代表一个群体的设计方案相互之间可以通过复制（reproduction）和杂交（crossover），并以一定的概率发生变异（mutation）。杂交倾向于由群体中最为优秀的个体承担，这些相互匹配个体的最好特性的结合使产生的后代比父代具有更优良的特性，产生较好的解。因此，遗传算法的搜索范围遍及整个解空间，能以较大的概率求得全局最优解。

对于导流组合模而言，根据前述建立的数学模型，需要优化的模具参数和优化目标之间关系可表示为：

$$SDV = g(l_{bmin}, h_g, w_{gmin}, s_g) \qquad (8.5\text{-}23)$$

式中各参数的取值范围为：

$2\ \text{mm} \leqslant l_{bmin} \leqslant 2.5\ \text{mm}$；　$13\ \text{mm} \leqslant h_g \leqslant 17\ \text{mm}$；

$6\ \text{mm} \leqslant w_{gmin} \leqslant 9\ \text{mm}$；　$0\ \text{mm} \leqslant s_g \leqslant 20\ \text{mm}$

如何寻找合适的l_{bmin}、h_g、w_{gmin}、s_g以使SDV值取得最小，这是一个非线性问题。由于适配值是非负的，优化方向应对应于适配值的增大方向，所以遗传算法中最小化问题通常转化为最大化问题，利用神经网络建立的数学模型，建立如下的适配值函数：

$$F = 10 - g(l_{bmin}, h_g, w_{gmin}, s_g) \qquad (8.5\text{-}24)$$

然后用遗传算法优化（图8.5-32），以解决模具参数的最佳匹配问题。

根据式（8.5-24）对模孔出口处流速均方差为优化目标的模具参数进行优化，具体步骤如下：

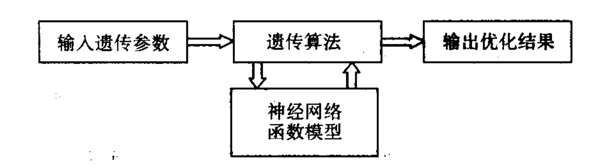


图8.5-32　遗传算法优化简图

1）初始种群的生成。在四维空间（l_{bmin}，h_g，w_{gmin}，s_g）上对解数据进行二进制编码，然后随机产生20个初始串结构数据，构成一个群体。GA以这个群体作为初始点开始迭代。

2）适配值评估检测。用10-SDV（神经网络计算得出）作为评价的标准值。

3）选择。根据各点适配值的高低，用轮盘赌的方法复制初始种群。

4）交叉。用简单交叉的方法随机地将新复制的个体两两配对，然后随机地将每一对的部分元素互换。

5）变异。随机地选择种群中的个体，使一些元素发生变异。

6）产生新一代，转至3）开始繁殖下一代，使种群始终想着优化的方向移动，最终求得最优解。

整个过程采用VC和M语言混合编程实现，优化结果如图8.5-33，优化后的适配值为9.485，对应的SDV值为0.515。该值比27组实验样本的SDV值小，并且该值与用优化后的模具参数模拟后的SDV值吻合良好，表明遗传算法用于模具参数优化是完全可行的。

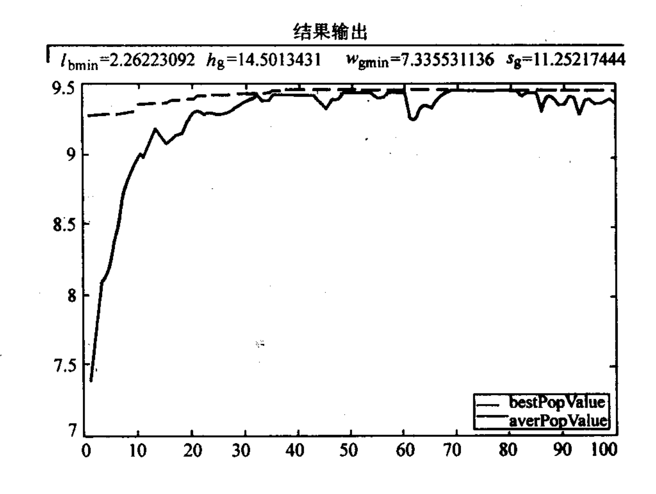


图8.5-33　遗传算法优化结果

为方便模具制造和加工操作，对模具参数进行圆整，圆整结果如下：

最小工作带长度$l_{bmin}=2.5$ mm；导流腔深度$h_g=15$ mm；

最小导流腔半宽$w_{gmin}=7.5$ mm；型心偏移量$s_g=11.5$ mm

按圆整参数加工的模具，在工厂一次试模成功（没有经过任何修模），实验表明模具性能完全达到要求。

编写：夏巨谌（华中科技大学）
闫　洪（南昌大学）



第 6 章　镁合金型材挤压成形工艺

1　镁合金的性能特点

镁合金具有许多其他金属与合金所没有的独特性能，其主要性能特点如下：

1）重量轻。镁金属是所有商业金属中重量最轻的金属，按 $\rho = 1.8\ g/cm^3$ 计算，镁合金比聚合物（塑料）轻 20%，比铝轻 30%，比钢轻 75%。

2）比强度高。即镁合金的强度与其质量之比高，具有一定的承载能力。

3）弹性模量小，刚性好。弹性模量小，抗震能力强；刚性好，表示长期使用不易变形。

4）抗电磁干扰及屏蔽性好。

5）色泽鲜艳美观，并能长期保持完好如新。

6）对环境无任何影响。镁金属及其合金是一种环保型材料，对环境无污染，其废料回收利用率高达 85% 以上，且其回收利用的费用仅为相应的新材料价格的 4% 左右。

但是它易燃烧、易腐蚀、高温及长时间保温易发生软化，对缺口敏感性高，除 Mg—Mn 合金外，塑性和流动性差且对变形速度敏感，锻造温度范围窄、且黏性大。

2　镁合金锻造与挤压工艺特点

2.1　坯料准备

镁合金锻造用材料主要有铸锭、挤压毛坯。目前大多数情况下都采用挤压毛坯。仅在锻造大型模锻件时，才采用铸锭作为原毛坯。锭于锻前其表面要进行机械加工，使其粗糙度达到 $R_a12.5$，并做高温均匀化处理，以改善其塑性。轧制毛坯仅供制造壁板类锻件之用。

为了获得力学性能均匀的锻件，挤压毛坯尽可能减少机械性能异向性，其办法是铸锭于挤压前要经过均匀化退火，其次是增大挤压时的变形程度。

挤压棒材表面涂有炮用油膏，因此先用布擦去表面大量油污，并用软木屑擦干净洗蚀除油，置于含除油剂的水溶液中除油。

镁合金下料可在圆盘锯、车床或专用的快速端面铣床上进行，而不采用剪床下料，除 AZ40M、ZK61M 外，一般不推荐在热态下剁切。ZK61M 挤压棒材常带有粗晶环，应扒皮。由于镁屑易燃，下料速度应缓慢，以防着火燃烧。切削时要严禁使用润滑剂和冷却液，以防镁屑燃烧和镁合金腐蚀。切屑要单独存放，防止尘土、切屑和水分混入。严禁烟火，保持工作地面的清洁，以防引起爆炸和燃烧。在工作区周围要备有防火用具（混合粉末熔剂或干砂、石墨等），禁止用水或其他种类的灭火器。

2.2　锻造与挤压前加热

坯料一般都在箱式电阻炉中加热，炉内最好通有保护气体和带有强制循环空气的装置，以保护炉温均匀，炉内温差不要超过 ±10℃。炉温用热电偶测量，热电偶装在距被加热坯料 100～150 mm 处，炉子应装上自动调节炉温仪器，仪器应能保证温度的测量精确度在 ±8℃之内。

入炉前的坯料，应清除掉坯料表面的镁屑、毛刺、油渍及脏物。镁合金坯料不能与钢料共处一炉，而且镁合金坯料不与加热元件接触，以免引起着火。坯料在炉中应均匀放置在炉底上，并保持一定的间隔，不要堆放。

镁合金的导热性良好，没有相变过程，所以采取快速加热不会产生热应力。任何尺寸的镁合金毛坯，都可以直接高温装炉，这样可以缩短加热时间。但是由于镁合金中的原子扩散速度慢，强化相的溶解需要较长时间，为了获得均匀组织的锻件，保证在良好塑性状态下锻造，实际所采用的加热时间还是较长的。加热时间通常按每 mm 坯料直径（或厚度）1.5～2 min 计算。坯料在炉中的加热温度和保温时间必须严格控制，因为镁合金在加热软化以后，一般不能用热处理方法加以强化。如果锻前加热超过一定温度或在一定温度下保温时间太长就会发生严重软化和晶粒长大，降低制件的力学性能。为了避免加热软化和晶粒长大，镁合金总的加热时间最好不超过 6 h。

由于镁合金的塑性对变形温度、变形速度、变形程度及应力状态等变形条件十分敏感，所以它属于低塑性合金，锻造和挤压温度范围比铝合金还要窄。国外常见的镁合金锻造和挤压温度范围见表 8.6-1～表 8.6-5。

表 8.6-1　镁合金的锻造和挤压温度和允许变形程度

合　金	温度范围/℃		允许变形程度/%		合金的塑性
	锤　上	压力机上	锤　上	压力机上	
M2M	320～500	320～500	80～85	85～90	高
ME20M	350～480	350～480	70	70～80	高
AZ40M	350～425	350～450	30	80	中
AZ61M	325～375	350～380	20～30	60	中下
AZ80M	不宜锤上锻	320～380	—	25～30	低
MB11	300～350	300～375	25～30	50～60	低
MB14	390～450	390～480	50～70	80	中
ZK61M	320～410	280～400	30～40	90	中



表 8.6-2　美国镁合金锻造温度

合　金	主要合金元素（RE 为稀土元素）/%	始锻温度/°F[①]	
		毛　坯	模　具
商　业　用　合　金			
ZK21A	2.3Zn，0.45Zr…………	625～550	600～500
AZ31B	3.0Al，1.0Zn…………	625～550	600～500
AZ61A	6.5Al，0.9Zn…………	675～600	650～550
高　强　度　合　金			
ZK60A	5.5Zn，0.45Zr…………	675～500	550～400
AZ80A	8.5Al，0.5Zn…………	750～600	550～400
高　温　合　金			
HM21A	2.0Th，0.8Mn…………	950～750	800～700
EK31A	3.0RE，0.6Zr…………	900～700	750～650
特　殊　合　金[②]			
ZE42A	4.0Zn，2.0RE…………	700～550	650～575
ZE62	6.0Zn，1.6RE…………	675～575	650～575
QE22A	2.5Ag，2.0RE…………	725～650	700～600

① $1°F=\frac{5}{9}°C$。

② 变形硬化合金必须在低于再结晶温度下加工；这三种合金除了在表中列举的主要元素外，还含标称的 0.6% 或 0.7% 的 Zr。

表 8.6-3　镁合金在锻锤和压力机上的锻造规范

合金牌号	锻造温度/℃				加热镦粗时最大允许的变形程度/%		拔长时允许的变形程度/%
	锻　锤		压力机				
	开始	终结	开始	终结	锻锤	压力机	
M2M、AZ40M、ME20M	430	340	420	300	60	80	25
AZ41M	420		400		50	70	15
AZ61M、AZ80M	400	300	390	280	35	60	—
ZK61M	410	340	400	300	60	75	20
MB13、MB17	480	400	450	380	50	70	—
MB14	420	350	400	340	45	65	

表 8.6-4　镁合金在模锻锤上和锻压机上的模锻温度

合　金	变　形　温　度/℃			
	锻锤和机械锻压机上模锻		模锻锤上冷加工	
	开　始	终　结	开　始	终　结
M2M、AZ40M	430	320	250	230
ME20M				
AZ41M	420	300	280	250
AZ61M、AZ80M	400		—	—
ZK61M	410	320	270	240
MB14	420	350	—	—
MB13	480	400		
MB17				

表 8.6-5　镁合金在液压机上的模锻温度

合　金	变　形　温　液/℃			
	液压机上模锻		冷加工	
	开　始	终　结	开　始	终　结
M2M、AZ40M	420	300	250	230
ME20M				
AZ41M	400		280	250
AZ61M、AZ80M	390	280	—	—
ZK61M	400	310	270	240
MB13	450	380	—	—
MB17				
MB14	420	390		
MB12	480	380		

2.3　锻造与挤压

（1）变形速度和变形程度

镁合金对变形速度十分敏感，随着变形速度的增加，镁合金的塑性显著下降，大多数镁合金在锤上变形时，允许变形程度不超过 30%～50%，而在液压机上变形时，塑性大大增加，变形程度可达 70%～90%，因此，镁合金的变形程度依设备的种类而异。M2M、ME20M 型低合金化合金对变形速度不大敏感，在锤上和压力机上都有较好的加工性能。

（2）锻件、挤压件、模具设计及工艺操作特点

由于镁合金在高温时具有较大的表面摩擦系数，流动性差，黏附力大，所以在锻件和锻模设计方面和铝合金有许多相似之处；例如余量、公差和模锻斜度、型腔粗糙度等两者是相同的。镁合金的工艺塑性比铝合金低，所以某些设计参数也略有差别；例如 ZK61M 和 AZ80M 合金锻件的腹板厚度比相同条件下的铝合金锻件要大一些，所允许的最大肋间距离在相同肋高条件下，较铝合金要小一些。而圆角半径，多数情况下相同，只是个别地方，如肋顶和肋底的圆角半径较铝合金大一些。

镁合金的锻造温度范围很窄，传热快，容易冷却，因此锻前工具和模具必须预热，模具、工具预热温度一般为 250～420℃。

镁合金的流动性差，只适用于单模膛模锻。对一些形状复杂，尺寸较大的模锻件，可以采用自由锻制坯，最后采用单模膛模锻。

在锤上锻造和模锻，开始锤击要轻要快，最后重击成型。对 AZ40M 和 ZK61M 合金，每轻击一次的变形程度则不超过 3%～5%。随着金属不断地充填模膛，变形程度可逐渐增加，从开始形成毛边时起，由于应力状态趋向有利，加大变形程度是合理的。但压力机上可不受此种限制，在实际生产条件允许的情况下，尽可能地在压力机上生产镁合金锻件。

（3）切边、精压和冷却

镁合金模锻件毛边的切除，通常采用带锯切割和铣切，切边模热切等方法。镁合金在低于 220℃时塑性很差，对拉应力很敏感。在高温时质地很软，黏性很大，所以低温时易拉裂，高温时易拉伤。切边裂纹成为镁合金锻造中的关键问题。带锯切割和铣切适用于生产批量不大，形状较简单或尺寸大的镁合金锻件，它不会产生切边裂纹，又省去了切边模制造。

当用切边模切除毛边时，采用咬合式模具。尽可能使凸凹模间的间隙小或无间隙，避免切边裂纹的产生，切边温度应在 200～300℃之间。

锻件的精压通常在模锻温度范围内进行。为了提高镁合



金制件的力学性能，获得所需要的精确度，最好采取在230～250℃时进行半热冷作硬化精压，半热冷作硬化时的平均变形程度应在10%～15%范围内。

镁合金锻件锻后通常在空气中冷却。国外资料报导镁合金锻后直接用水冷却，这样可以防止进一步再结晶和晶粒长大，对于某些时效强化合金，水冷获得过饱和固溶体组织，在最后的时效处理过程中，有利于沉淀析出。

镁合金型材挤压后在空气中冷却即可。

2.4 清理和热处理

镁合金锻件在锻造工序间的停留超过半月以上（7、8、9月不得超过10天）或者锻后不能及时进行机械加工的锻件，需要进行氧化处理。以防锻件表面锈蚀。氧化处理前需进行除油和酸洗。

除油之后，用50～60℃的热水洗涤0.5～2.0 min，再用洁净的流动冷水冲洗，然后进行酸洗。酸洗的目的是将锻件表面上自然氧化物和其他杂质腐蚀掉，使它露出基体金属表面，为氧化处理作好准备，同时可以更清晰地暴露锻件表面的折迭、裂纹、拉伤等缺陷，以便修伤、清除缺陷。修伤处要圆滑过渡，缺陷要一律清除干净。只有缺陷彻底清除以后，才能进行再次模锻，如果修伤不彻底，再次模锻时隐藏的缺陷就会继续扩展，使锻件报废。

常用的镁合金锻件化学氧化溶液的配方及工艺见表8.6-6。

表 8.6-6 常用镁合金锻件化学氧化溶液配方及工艺条件

编号	溶 液 成 分	体积质量/$g \cdot L^{-1}$	温度/℃	时间/min	膜层颜色
1	重铬酸钾 $K_2Cr_2O_7$ 硝酸 HNO_3（密度1.42） 氯化铵 NH_4Cl（允许食盐代）	40～55 90～120 0.75～1.25	70～80	0.5～2.0	草黄色到棕色
2	重铬酸钾 $K_2Cr_2O_7$ 铝钾钒 $K_2Al_2(SO_4)_4 \cdot 24H_2O$ 醋酸（60%）	30～50 8～12 5～8	15～30	3～15	金黄色到棕褐色

注：1. 槽液成分应每季度分析一次，根据分析结果及时调整比例。
2. 工序之间的氧化处理以1号溶液为宜。

锻件在氧化槽液中氧化处理后，应立即在流动的洁净的室温冷水槽中清洗0.5～2 min，再在低于50℃的热水槽中清洗0.5～2 min，然后以50～70℃的热压缩空气或室温干燥的压缩空气将锻件吹干。整个操作过程，必须注意不要碰伤氧化膜，否则，需重新氧化或局部氧化处理。

经过氧化处理的锻件，表面上形成一层金黄色的致密连续的氧化膜。如果没有后续的锻造变形工序或者不能及时进行机械加工，锻件氧化后需涂油包装封存。未经涂油的锻件，在正常条件下保存期不得超过一个月。最近开始采用不氧化上色的塑料包装，质量也很好。

镁合金锻件的热处理主要是软件退火及淬火、时效。热处理不能强化的镁合金M2M、ME20M和热处理强化作用不大的AZ40M、AZ41M、AZ61M，只用软化退火。热处理可以强化的AZ80M、ZK61M，通常进行淬火、时效处理。因此，镁合金锻件在锻后一般不进行退火处理。但为了便于随后的冷压力加工，需要按软化退火工艺进行退火处理。

3 镁合金型材挤压成形工艺

镁具有密排六方晶格，室温下只有基面{0001}产生滑移，因此镁及镁合金常温下塑性很低，进行塑性成形加工很难；200℃以上时第一类角锥面{1011}产生滑移，塑性得到一定程度的提高；225℃以上时第二类角锥面{1012}也可能产生滑移，塑性进一步提高；高温尤其400℃以上很容易产生腐蚀氧化以及晶粒粗大，因而总体来说镁合金塑性加工困难。然而通过塑性加工过程控制或改善镁合金组织性能，可以大大提高其塑性变形能力，尤其是热挤压工艺。只有解决镁合金塑性加工的技术难题，才能使镁合金得到广泛应用。为此，本节将作者对镁合金实心棒料、矩形断面和圆形断面的薄壁空心型材挤压成形工艺的实验研究与开发介绍如下。

3.1 实验材料及设备

实验使用的材料为AZ31镁合金（对应国内标准AZ40M），其化学成分为：2.5%～3.5% Al；0.15%～0.5% Mn；0.6%～1.4% Zn；0.05% Ca max；0.005% Ni max；0.005%Fe max；0.1% Si max；其他总量0.3% max；余量为Mg。其材料性能：抗拉强度$\sigma_b \geqslant 214$ MPa，伸长率$\delta \geqslant 16\%$。实验设备采用1 000 kN液压机，精确温控加热炉，挤压力测试系统，自行设计了挤压模具及模具预热装置。

3.2 挤压工艺参数确定

1）坯料加热温度。镁合金状态图是确定镁合金挤压温度的首要依据。从镁合金状态图中可以得到某种镁合金的熔化温度和合金中有第二相析出时温度。于是可以得到挤压温度范围在这两个温度范围内，但这只是一个粗略的温度范围。为了比较准确的确定该种镁合金的挤压温度范围，需要对这种镁合金的塑性图和变形抗力图以及再结晶图加以分析研究。从镁合金的塑性图可以得到在某个温度范围内其塑性最高。于是坯料的加热温度范围可以选择在这个温度范围之内。AZ31的熔化温度是603℃，从230℃开始，合金中有第二相析出。因此，AZ31的挤压温度范围一定在230～603℃范围内。从AZ31镁合金的塑性图看出，在350～400℃的温度范围内塑性最高。实验挤压时坯料加热温度为400℃。

2）模具预热温度。镁合金变形温度范围狭窄，而导热性能良好，遇到冷模会产生激冷而造成裂纹。所以挤压前要对模具进行预热，其目的有两个：一是使挤压毛坯放人模具时毛坯降温不致过快，以免使塑性降低，变形抗力增加，同时可避免毛坯表面和中心层温差过大，致使变形不均匀性增加，以至造成挤压件和模具的损坏；二是可以减小模具与毛坯接触时的温差。由于坯料与模具接触面积大，接触时间长，模具必须加热到比坯料低的不太多的温度，故模具预热温度范围为260～300℃。

3）挤压速度。挤压速度对变形抗力及塑性的影响决定于切应变（或硬化）与软化过程（恢复与再结晶）之间的相互关系。当变形速度较高时，因变形引起的热效应，会使挤压毛坯的温度升高，从而流动应力明显降低；当变形速度再



增高时，虽然毛坯的升温很明显，但是由于变形过程中金属的加工硬化速度比再结晶过程中的软化速度快，坯料的流动应力不但不减小，反而明显增大。因此挤压过程中必须认真控制挤压速度。挤压速度对变形热效应，变形均匀性，再结晶和固溶过程，制品力学性能及制品表面质量均有重要影响。挤压速度过快，制品表面会出现麻点、裂纹等倾向。同时挤压速度过快，增加了金属变形的不均匀性。

AZ31属于Mg-Al-Zn系合金，对挤压速度特别敏感，因此成形应以较低的挤压速度进行挤压，在实验中挤压速度为12 mm/s。

4）润滑剂。为了减轻镁合金坯料与挤压筒及凹模工作带之间的摩擦，防止粘模，减低摩擦力，有利于金属流动，必须使用润滑剂进行润滑。此时润滑剂还可以起到隔热作用，从而提高模具寿命。实验中采用专用的石墨水剂润滑剂，起到了比较理想的润滑效果。

5）变形程度。镁合金的挤压件的宏观组织及力学性能与总的变形程度有很大的关系。变形程度大的镁合金挤压件比变形程度小的镁合金挤压件力学性能高，为了使镁合金挤压件获得一致的力学性能，挤压的总变形程度应不小于75%。本实验的变形程度为95%。

6）加热时间。镁合金的导热性良好，故任何尺寸的镁合金毛坯，都可以直接高温装炉，但是镁合金中的原子扩散速度慢，强化相的溶解需要较长时间。为了获得均匀组织，保证在良好塑性状态下挤压，因此实际所采用的加热时间还是较长的。

通常，镁合金挤压前加热时间，可以参照镁合金锻造时[20]加热时间的计算方法来计算。即直径小于50 mm的毛坯，按每毫米直径或厚度加热1.5 min计算；直径大于100 mm的毛坯，按每毫米直径2.5 min计算；对直径在50～100 mm范围内的毛坯，可按照如下推荐的加热速度计算公式确定

$$T=[1.5+0.01(d-50)]d$$

式中，T为加热所需要时间，min；d为毛坯的直径，mm。

如果挤压过程被迫中断的时间不超过2 h，毛坯可以留在炉内，但应降低炉温（约120℃）。当继续挤压时，毛坯应重新加热到挤压温度上限，这时的加热时间的计算，是按炉温达到规定的温度时算起，每毫米（直径或厚度）所需的加热时间为上述计算时间的一半。若挤压过程中断超过2 h，则需将毛坯从炉内取出，置于静止空气中冷却，以后再重新加热挤压。

3.3　实验研究结果与应用

在实验过程中，对挤压力进行了测试，其挤压力测试结果如图8.6-1所示。变形程度对挤压力的影响如图8.6-2所示。

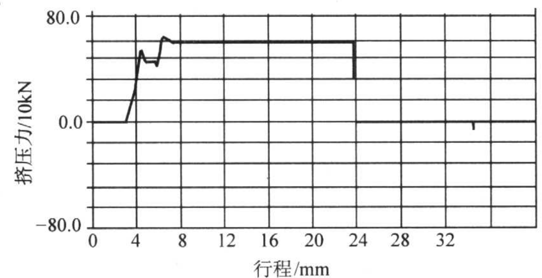


图8.6-1　AZ31镁合金挤压变形时力行程曲线

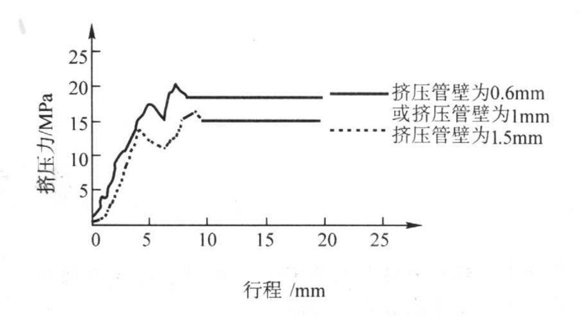


图8.6-2　变形程度对AZ31镁合金挤压变形力的影响

在挤压过程中，变形力随挤压过程的进行而变化。从图8.6-1中我们可以看出，AZ31镁合金首先发生弹性变形，挤压力迅速上升，随着挤压的继续进行，AZ31镁合金发生塑性变形，进入塑性流动阶段，挤压力有所下降；挤压继续进行，金属进入到凹模口，流动阻力增大，挤压力上升，当金属即将流出凹模口时，挤压力达到最大值，随着金属流出凹模口，挤压力有所下降，以后并保持稳定。

图8.6-2是圆形断面空心型材挤压过程中的挤压力－行程曲线，从中可以看出，挤压力随着变形程度即挤压不同的管壁厚度的减小而增加。这是由于管壁越薄金属塑性变形程度越大，而且流动阻力越大，所以随着变形程度的增大，其挤压力增大。

影响变形力主要因素有：坯料温度、模具温度、润滑方式、凹模形状等。随着坯料温度的增加，变形抗力峰值减少，稳定阶段的挤压力随之减小；模具温度增高，使坯料温度下降较慢，变形抗力变化较慢，挤压力变化趋于平稳；润滑剂性能越好，摩擦力越小，其挤压力越小。

根据上述挤压工艺参数，挤压得到镁合金实心棒材、矩形断面和圆形断面的薄壁空心型材如图8.6-3所示。其内外表面质量好，无裂纹、划伤、气泡、起皮等缺陷，表面粗糙度和尺寸精度均达到设计要求。

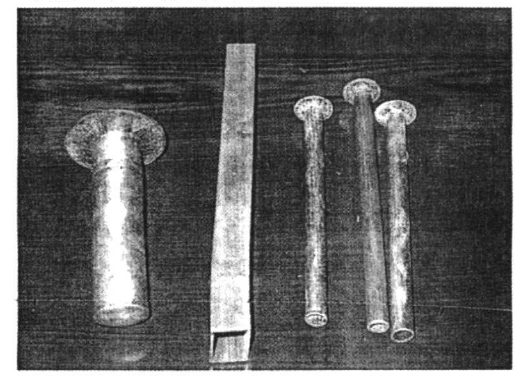


图8.6-3　镁合金型材试样

近年来，德国洪塞尔公司（Honsel Gmbh&COKG）通过研究发现，镁合金挤压件的截面的几何形状与高强度铝合金挤压件相似，中空轮廓和壁厚小于1.5 mm零件的生产都毫无问题。由于镁合金挤压模具比相应压铸模成本低，因此，镁合金挤压件的成本一般比类似的压铸件低，当挤压速度由3 m/min提高到6 m/min时，其产品成本降低约30%。

编写：夏巨谌（华中科技大学）
闫　洪（南昌大学）



参考文献

1 刘静安. 铝型材挤压模具设计：制造、使用及维修. 北京：冶金工业出版社，1999

2 李德群，唐志王. 中国模具设计大典：第2卷. 南昌：江西科学技术出版社，2003

3 M.э. 叶尔曼诺克，B.H. 费依金，H.A. 苏霍鲁柯夫著. 铝合金型材挤压. 李西铭，张渌泉译. 北京：国防工业出版社，1982

4 周飞，彭颖红，阮雪榆. 铝型材挤压过程有限元数值模拟. 中国有色金属学报，1998，8（4）：637～642

5 闫洪，包忠诩，柳和生等. 角铝型材挤压过程的数值模拟. 中国有色金属学报，2001，11（2）：2002～2005

6 闫洪，夏巨谌，李志刚等. 工艺参数对铝型材挤压变形规律的影响. 中国有色金属学校，2002，12（6）：1154～1161

7 闫洪，夏巨谌，胡国安. 型材挤压过程工艺参数优化模型. 机械工程学报，2002，38（10）：78～81

8 闫洪，夏巨谌，包忠诩等. 型材挤压模工作带长度设计计算的数学建模. 塑性工程学报，2002，9（1）：70～73

9 邹琳. 基于遗传算法的挤压模具多目标优化设计与研究：[博士论文]. 武汉：华中科技大学，2004

10 中国机械工程学会锻压学会. 锻压手册：第1卷，锻造. 北京：机械工业出版社，1993

11 李海江. 镁合金挤压成形工艺及数值模拟的研究：[硕士论文]. 武汉：华中科技大学，2003



第9篇

塑性成形 CAD/CAM

主 编 李志刚

编 写 李志刚

审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会



第1章　概　　论

计算机的问世是技术进步所取得的最大的成就之一。随着计算机技术的不断发展和应用领域的日益扩大，涌现出了一些以计算机技术为基础的新学科。

CAD/CAM（计算机辅助设计/计算机辅助制造）自20世纪60年代以来得到了迅速发展。由于计算机硬件和软件技术的迅速发展，CAD/CAM技术日趋完善，已在电子、航空和机械制造等部门得到了广泛应用。

模具是实现材料塑性成形的重要工艺装备，其设计、制造水平和产品的质量、成本及生产周期息息相关。随着制造工业的发展，产品对模具的要求越来越高。人工设计、单件生产这种传统的模具设计与制造方式已无法适应工业迅速发展的需要。计算机辅助设计与制造（CAD/CAM）技术是解决模具设计与制造薄弱环节的有效途径。

1　CAD/CAM的基本概念

1.1　概念

CAD（计算机辅助设计）和CAM（计算机辅助制造）是一门新兴的综合性计算机应用技术。计算机辅助设计和制造，简称CAD/CAM，指的是以计算机作为主要技术手段，处理各种数字信息与图形信息，辅助完成产品设计和制造中的各项活动。

计算机辅助设计是人和计算机相结合、各尽所长的新型设计方法。从思维的角度看，设计过程包含分析和综合两个方面的内容。人可以进行创造性的思维活动，将设计方法经过综合、分析，转换成计算机可以处理的数字模型和解析这些模型的程序。在程序运行过程中，人可以评价设计结果，控制设计过程；计算机则可以发挥其分析计算和存储信息的能力，完成信息管理、绘图、模拟、优化和其他数值分析任务。人和计算机相结合，在设计过程中两者发挥各自的优势，有利于获得最优设计结果，缩短设计周期。

计算机辅助制造是利用计算机对制造过程进行设计、管理和控制。一般说来，计算机辅助制造包括工艺设计、数控编程和机器人编程等内容。工艺设计主要是确定零件的加工方法、加工顺序和所用设备。近年来，计算机辅助工艺设计（CAPP）已逐渐形成了一门独立的技术分支。当采用NC（Numerical Control，数控）机床加工零件时，需要编制NC机床的控制程序。计算机辅助编制NC程序，不但效率高，而且错误率很低。在自动化的生产线上，采用机器人完成装配和传送等项任务。利用计算机也可以实现机器人编程。在本书的CAM部分，主要阐述NC加工原理与程序编制，而不涉及机器人编程问题。

CAD/CAM系统可以从不同的角度加以分类。

按系统的功能范围，CAD/CAM系统可分为通用系统和专用系统两类。通用的CAD/CAM系统功能全面，适用范围较广。例如，CATIA、UG和Pro/Engineer等系统均属此类。这类CAD/CAM系统通常包括线框、实体和曲面造型模块、绘图模块、装配与零件设计模块、有限元分析模块、数据交换与传输模块和NC加工模块。专用的CAD/CAM系统指的是那些为特定的应用而开发的系统。这类系统通常只能适用于一定的专业，或用于解决某一类问题。例如，冲模CAD/CAM系统和注塑模CAD/CAM系统皆属此类。

按运行方式，CAD/CAM系统可分为交互式系统和自动化系统。虽然人们正在研究以人工智能方法为基础的CAD/CAM系统，但限于目前的技术发展水平，计算机尚难以自动地完成设计和制造中的全部工作。因此，绝大多数CAD/CAM系统都属于交互式系统。这种系统以交互方式运行，由计算机检索数据，分析计算，并将运算结果以图形或数据的形式显示在屏幕上，用户可利用键盘和鼠标等交互设备输入参数，选择方案，修改设计，控制运行的进程。

从硬件的角度CAD/CAM系统可分为：

1）主机系统。这种系统以大（中）型计算机为主机，多台终端与主机连接，或者通过远程分时终端与主机连接。这种系统的优点是具有高速、大容量的内存和外存，主机计算能力强，集中的数据库管理系统统一管理数据，可运行规模较大的应用软件，有功能强的图形支撑软件，可以将设计、分析、计算、图形处理等项工作结合起来，完成复杂的CAD/CAM工作。这种系统的缺点是多用户分享主机，给CPU带来较重的负担，一旦主机出现故障，将影响所有用户。随着同时使用终端的增加，或计算工作量加大时，系统响应将变得很慢。

2）独立型CAD/CAM系统。这类系统是专门为特定用户配置的计算机硬软件配套系统。系统配有专用软件和硬件，工作的针对性很强，其性能完全取决于应用软件的水平。

3）工作站系统。这类系统以图形工作站为主机，以UNIX操作系统为主，系统的可移植性、兼容性和安全性好，计算速度快，并具有强大的图形处理功能。

4）微机系统。这类系统是单用户以微机为主机的基本系统。其配置简便，投资小，特别适用于中小企业应用CAD/CAM技术。目前微机CAD/CAM系统的发展呈现出非常迅猛的趋势，其性能完全可以与工作站系统相媲美。特别是以前需要在工作站上运行的高档CAD/CAM系统，如Pro/E和UG等，都有了微机版本。

5）网络分布式CAD/CAM系统。微机CAD工作站虽能独立进行CAD/CAM工作，但毕竟其硬软件资源有限。为了增加微机CAD/CAM工作站的功能，采用计算机网络将分散于同一工厂企业不同部门的微机连接在一起，可共享硬软件资源，也可以组成团队，共同完成非常复杂的CAD/CAM工作。

另外，按软件的开放性CAD/CAM系统还可分为交钥匙系统（Turn-Key System）和可编程系统（Programmable System）。

1.2　计算机在设计和制造中的辅助作用

计算机辅助设计与制造这一术语本身包含了这样的意思，即在人能有效发挥作用的地方不用计算机，反之在计算机可被有效利用的场合不用人。计算机在设计和制造过程中起重要的辅助作用，但不是取代人的作用。为了弄清二者的作用，使人和计算机更好地结合，共同完成产品的设计与制造，有必要比较一下人和计算机的特点。表7.1-1为人机特点的比较，由表中可以看出人和计算机的能力在绝大多数方面是互补的。在某些地方人胜过计算机，在另一些地方计算机则优于人。

表 9.1-1 人机特点的比较

项目	人	计算机
推理与逻辑判断	通过经验、想象进行直觉的逻辑推理	模拟的、系统的逻辑推理
信息的组织	非格式的、直觉的	格式化的、详细的
信息存储能力	差、且与时间有关	强、与时间无关
对重复工作的耐力	差	强
提取重要信息的能力	强	差
出错机会	多	少
分析能力	直觉分析能力强，数值分析能力差	无直觉分析能力，数值分析能力极强

计算机在设计和制造中的辅助作用主要体现在数值计算、数据存储与管理、图样绘制三个方面。

计算机作为计算工具使用的优越性显而易见。人工计算容易发生错误的问题在这里得到了完全的克服。许多需要多次迭代的复杂运算，只有用计算机才能完成。一些设计分析方法，例如优化方法、有限元分析，离开计算机便难以实现。计算机作为计算工具提高了计算的速度和精度，保证了结果的正确性。

计算机可靠的记忆能力，使其能够在数据存储与管理方面发挥重要作用。例如，常规设计时，设计人员必须从有关的技术文件或设计手册中查找数据，不但费时，而且容易出错。使用 CAD/CAM 系统时，标准的数据存放在统一的数据库中，检索存储方便迅速。有了数据库，设计人员便不再需要记忆具体的数据，也不必关心数据的存储位置，可以全神贯注于创造性的工作。

图样是工程的语言，是人们交流思想的工具。虽然 CAM 将使图样在制造中的作用逐渐消失，但图样在审查设计方案、检验产品等方面的作用仍将存在。图样的绘制工作约占整个设计工作量的 60% 以上，因此计算机绘图是对设计工作的有力辅助。这就是为什么计算机绘图被广泛使用的原因。另外，实际设计中很大一部分图样只是在现有设计的基础上加以局部修改。一旦图形数据存储于图库之中，它们可以重复使用，可以进行修改与编辑，以产生新的图形。

人和计算机相结合，恰当地发挥二者的作用对 CAD/CAM 十分重要。在建立一个 CAD/CAM 系统时，应在以下几个方面考虑人机的特点。

经验与判断相结合在产品和工艺过程设计中是不可缺少的，所以设计过程必须由人控制。设计人员应能在设计的各个阶段行使控制权，应能利用其直觉进行设计，而不一定要遵循计算机的设计逻辑。计算机的学习能力很差，学习的任务应由人来完成。人可以从过去的设计中学习，总结经验。

对于费时费力的数值分析工作，计算机可以高速精确地完成。在设计中应尽可能多地让计算机完成数值分析工作，使人有更多的时间利用数值分析的结果和他本身的直觉分析能力完成决策性的工作。

计算机具有永久存储信息的能力，对重复性工作有极强的耐力。所以，在设计和制造过程中，信息的存储管理应在人的指导下由计算机完成。像绘制图样之类繁琐的、令人疲倦的工作，适合于计算机去完成，将人从重复劳动中解放出来。

计算机具有系统检错的能力，人则可用直觉方式检错。一般说来，让计算机自动改正错误是困难的。因此，改正错误、修改设计的任务应由人来完成。

总之，在设计和制造中计算机可以起到重要的辅助作用，正确地处理人机关系，发挥二者各自的优势，是 CAD/CAM 中的一个重要问题。

1.3 CAD 与 CAM 的集成

计算机辅助设计和计算机辅助制造关系十分密切。开始，计算机辅助几何设计和数控加工自动编程是两个独立发展的分支。但是随着它们的推广应用，二者之间的相互依存关系变得越来越明显了。设计系统只有配合数控加工，才能充分显示其巨大的优越性。另一方面，数控技术只有依靠设计系统产生的模型才能发挥其效率。所以，在实际应用中二者很自然地紧密结合起来，形成了计算机辅助设计与制造集成系统。在 CAD/CAM 系统中，设计和制造的各个阶段可利用公共数据库中的数据。公共数据库将设计与制造过程紧密联系为一个整体。数控自动编程系统利用设计的结果和产生的模型，形成数控加工机床所需的信息。CAD/CAM 可大大缩短产品的制造周期，显著提高产品质量，从而产生巨大的经济效益。

由于制造过程中所需的信息和数据大量来自设计阶段，因此对设计和制造而言，这些数据和信息是共享的。设计系统只有配合数控加工，才能显示其巨大的优越性。同时，数控系统只有依靠设计系统产生的模型才能发挥其效率。将计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助制造（CAM）二者结合起来，形成集成系统，这就是所谓的“CAD/CAM 一体化技术”。尽管目前许多企业的 CAD 和 CAM 还未实现集成，但随着生产技术的发展，不同功能的 CAD 和 CAM 模块的信息将能够相互传递，最终把 CAD 和 CAM 融合为一体。

CAD 和 CAM 集成系统的工作步骤如下：

1）CAD 过程设计产品结构，产生产品模型，绘制产品图样，为 CAM 过程准备设计数据。

2）产生标准化的数据结构（比如生成 STEP 文件），并经过接口进行数据转换。

3）生成零件加工工艺规程。

4）生成数控编程所需的数据，并按一定的标准转换成相应的中性文件。

5）自动生成数控程序。

需要提到的是，以 CAD/CAM 为基础，产生了一系列相关的概念和技术，如计算机辅助工程（CAE）、计算机辅助工艺设计（CAPP）、柔性制造系统（FMS）、快速原型技术（RP）、计算机集成制造系统（CIMS）、反向工程（RE）、并行工程（CE）、敏捷制造（AM）和虚拟制造（VM）等。

2 模具 CAD/CAM 技术的应用

2.1 CAD/CAM 技术在模具行业的应用状况

随着工业技术的发展，产品对模具的要求愈来愈高。传统的模具设计与制造方法不能适应工业产品及时更新换代和提高质量的要求。因此，国外先进工业国家对模具 CAD/CAM 技术的开发非常重视。早在 20 世纪 60 年代初期，国外一些飞机和汽车制造公司就开始了 CAD/CAM 的研究工作，投入了大量人力和物力。各大公司都先后建立了自己的 CAD/CAM 系统，并将其应用于模具的设计与制造。

这些公司采用模具 CAD/CAM 技术的主要理由是：



1）利用几何造型技术获得的几何模型，可供后续的设计分析和数控编程等方面使用。

2）可以缩短新产品的试制周期，例如在汽车工业中，可缩短模具的设计制造周期。

3）提高产品质量的需要，如汽车车身表面等形状，需要利用计算机准备数据和完成随后的制造工作。

4）模具制造厂和用户对CAD/CAM的需要增加。例如，利用磁盘进行数据传送，用户要求模具制造单位能够交换信息和处理这些数据。

5）模具加工设备的效率不断提高，需要计算机辅助处理数据，以提高设备利用率。

6）在企业中建立联系各个部门的信息处理系统。

模具CAD/CAM技术发展很快，应用范围日益扩大。在冲模、锻模、挤压模、注塑模和压铸模等方面都有比较成功的CAD/CAM系统。采用CAD/CAM技术是模具生产革命化的措施，是模具技术发展的一个显著特点。

工业国家较大的模具生产厂家在CAD/CAM上进行了较大的投资，正大力开发这一技术。如法国FOS模具公司购买了大型CAD/CAM系统，日本黑田精工株式会社大力投资开发CAD/CAM系统，瑞士法因图尔公司采用大型CAD/CAM系统设计加工模具。应用CAD/CAM技术较早的为美、日、德等国。

例如，日本丰田汽车公司于1965年将数控用于模具加工。80年代初期开始采用覆盖件冲模CAD/CAM系统。该系统包括设计覆盖件的NTDFB和CADETT软件和加工凸、凹模的TINCA软件。利用三坐标测量仪测量黏土模型，并将数据送入计算机。将所得图形经平滑处理后，再把这些数据用于覆盖件设计、冲模的设计与制造。该系统有较强的三维图形功能，可在屏幕上反复修改曲面形状，使工件在冲压成形时不致产生工艺缺陷，从而保证了模具和工件的质量。模具型面的模型保存在数据库中，TINCA软件可利用这些数据，进行模具型面的数控加工。

模具CAM在国外应用较广，计算机控制的数控机床加工模具已超过40%。此外，加工中心（MC）、柔性制造系统（FMS）也已用于模具制造。

我国模具CAD/CAM的研究开发开始于20世纪70年代末，发展也很迅速。到目前为止，先后通过国家有关部门鉴定的有精冲模、普通冲裁模、辊锻模、锤模和注塑模等CAD/CAM系统。但是，这些系统大多尚未在生产中推广应用。为迅速提升我国模具工业的技术水平，今后应继续加速模具CAD/CAM的研究开发和推广应用工作。

2.2 模具CAD/CAM的优越性

模具CAD/CAM的优越性赋予了它无限的生命力，使其得以迅速发展和广泛应用。无论在提高生产率、改善质量方面，还是在降低成本、减轻劳动强度方面，CAD/CAM技术的优越性是传统的模具设计制造方法所不能比拟的。

第一，CAD/CAM可以提高模具的质量。在计算机系统内存储了各有关专业的综合性的技术知识，为模具的设计和工艺的制定提供了科学的依据。计算机与设计人员交互作用，有利于发挥人机各自的特长，使模具设计和制造工艺更加合理化。系统采用的优化设计方法有助于某些工艺参数和模具结构的优化。

第二，CAD/CAM可以节省时间，提高生产率。设计计算和图样绘制的自动化大大缩短了设计时间。CAD与CAM的一体化可显著缩短从设计到制造的周期。例如，采用冲裁模CAD/CAM系统设计制造模具，比传统方法提高效率5倍以上。由于模具质量提高，可靠性增加，试模时间明显减少，模具的交货时间大大缩短。

第三，CAD/CAM可以较大幅度地降低成本。计算机的高速运算和自动绘图大大节省了劳动力。优化设计带来了原材料的节省，例如，冲压件的毛坯优化排样可使材料利用率提高5%～7%。采用CAM可加工传统方法难以加工的复杂模具型面，可减少模具的加工和调试工时，使制造成本降低。CAD/CAM的经济效益有些可以估算，有些则难以估算。由于采用CAD/CAM技术，生产准备时间缩短，产品更新换代加快，大大增加了产品的市场竞争能力。

第四，CAD/CAM技术将技术人员从繁冗的计算、绘图和NC编程工作中解放出来，使其可以从事更多的创造性劳动。

模具CAD/CAM的优越性还可以列举不少。所有这些，将使CAD/CAM逐步取代传统的模具设计制造方法，最终将在模具设计制造中居统治地位。

2.3 模具CAD/CAM的特点

（1）模具CAD/CAM系统必须具备描述物体几何形状的能力

有些设计过程最初提出的要求是一些参数或性能指标。例如，设计锻压设备提出的要求是吨位、行程、封闭高度或其他使用性能，并不规定设备的形状如何。但是，模具设计则不同，因为模具的工作部分（如拉深模、锻模和注塑模的型腔）是根据产品零件的形状设计的，所以无论设计什么类型的模具，开始阶段必须提供产品零件的几何形状。这就要求模具CAD系统具备描述物体几何形状的能力，即几何建模型的功能。否则，就无法输入关于产品零件的几何信息，设计程序便无法运行。另外，为了编制NC加工程序，计算刀具轨迹，也需要建立模具零件的几何模型。因此，几何造型是模具CAD/CAM中的一个重要问题。

（2）标准化是实现模具CAD的必要条件

模具设计一般不具有惟一性。对于同一产品零件，不同设计人员设计的模具不尽相同。为了便于实现模具CAD，减少数据的存储量，在建立模具CAD系统时首先要解决的问题便是标准化问题，包括设计准则的标准化、模具零件和模具结构的标准化。有了标准化的模具结构，在设计模具时可以选用典型的模具组合，调用标准模具零件，需要设计的只是少数工作零件。标准化工作涉及的问题较多，有技术问题，也有管理问题。目前我国已颁布“标准化法”，对于已公布的模具标准，模具CAD中应予贯彻使用。

模具CAD由于其自身的特点，要求采用系统的、定量的设计方法。因此，种类繁多的成形零件和成形工艺，以及缺乏系统的、定量的设计方法，是建立模具CAD系统时遇到的一个突出矛盾，解决这一矛盾的有效途径便是成组技术（Group Technology，简称GT）。

成组技术用于塑性加工，就是按照成形零件的形状、尺寸和材料的不同，将其加以分类，根据各类成形零件的不同特点，采用不同的生产工艺和模具设计方法。成组技术有助于以定量的方式表述现有的设计经验，建立系统的设计方法，这样，就使得在现有技术发展水平上较容易建立模具CAD系统。

（3）设计准则的处理是模具CAD中的一个重要问题

人工设计模具所依据的设计准则大部分是以数表和线图形式给出的。在编制设计程序时，必须对这些数表和线图进行恰当的处理，将其变为计算机能够处理的表达形式。程序化和公式化是处理数表或线图形式设计准则的基本方法。对于某些定性的设计准则，计算机程序无法采用，需要深入研究，总结出便于使用的定量的设计准则。有些经验准则难以程序化或公式化，这时就需要通过人机交互方式发挥经验的作用。

（4）模具 CAD/CAM 系统应具有充分的柔性

模具的结构随产品的不同而变化，模具型面的几何形状复杂。现阶段，模具的设计方式基本上属于经验设计，设计质量在很大程度上取决于设计者的技巧。模具的生产方式为单件的或小批量的，大量生产模具的情况极为少见。所有这些，要求模具 CAD/CAM 系统具有充分的柔性，即可以根据不同产品的特点和生产条件，灵活地作出抉择，方便地修改设计。因此，在开发模具 CAD/CAM 系统时，不仅要考虑全面的功能、较高的效率，还应提供充分的柔性。这是实用化的模具 CAD/CAM 系统所应具备的基本条件之一。

3 传统的模具设计制造与模具 CAD/CAM 的比较

为了更好地理解 CAD 技术如何在模具设计中发挥作用，本节将讨论传统模具设计制造与采用 CAD/CAM 技术设计加工模具的差别。

3.1 传统的模具设计与制造

传统的模具设计与制造过程包括工艺设计、模具结构设计、工艺模型制造、零件加工、试模与调试和检测等，其流程如图 9.1-1 所示。对于不同类型的模具，其工艺设计与模具结构设计的内容各不相同，加工方法也有所不同，但都要经过图 9.1-1 所示的过程。

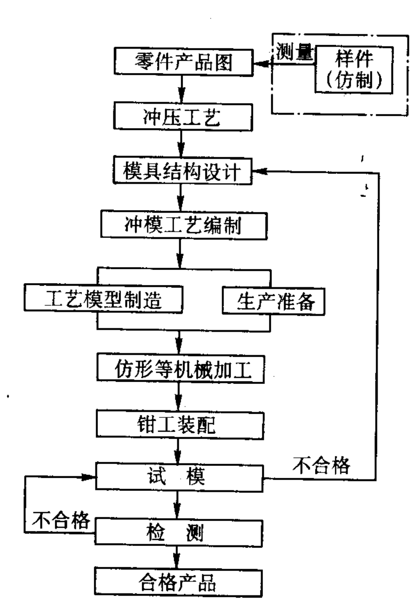


图 9.1-1　传统的模具设计制造流程

传统的模具设计制造方式有以下特点：

1）产品设计信息以二维图样为主，对于复杂零件，要辅以样件或模型表示零件的形状。

2）进行工作零件设计时，需要对产品图进行再设计，如冲模设计中的毛坯展开和刃口设计，注塑模设计时计算材料的收缩率等。

3）模具设计凭经验进行，结果难以预测。

4）模具设计效率低，信息共享程度差。

5）工艺模型的制造质量决定着整套模具的加工质量。

6）仿形加工是大型型腔模具的主要方式，模具的研配和调试工作量很大。

为解决上述问题，在模具设计与制造中应用 CAD/CAM 技术是有效的途径。CAD/CAM 技术不仅能提高一次试模成功率，同时可实现信息的共享与集成，达到提高模具设计与制造的质量，缩短模具设计制造周期的目的。

3.2 集成的模具设计制造过程

图 9.1-2 所示为集成的汽车覆盖件模具设计制造流程图，其中，产品的定义分为三类，即二维工程图、实物模型和电子产品数据。从系统集成的角度来看，以电子产品数据最为方便。对于主模型和样件，首先在三维坐标测量机上进行三维扫描，然后进行三维几何造型，其几何模型可直接用于 NC 编程，或直接利用型面数字化点自动编程直接生成 NC 加工程序。对于二维工程图，则要先进行三维几何造型，然后进行 NC 编程。几何造型所得的几何模型、产品 CAD 设计的产品模型，以及通过中性文件交换接口得到了产品几何模型，可输入模具 CAD 系统，进行冲压工艺、模具型面和模具结构的设计，其中三维曲面模型可用于 NC 工艺编程。生成的 NC 程序和工艺文件，可通过网络传到车间加工现场，验证模型 NC 程序或试切后，最后完成覆盖件模具的 NC 加工，形成合格的覆盖件模具成品。

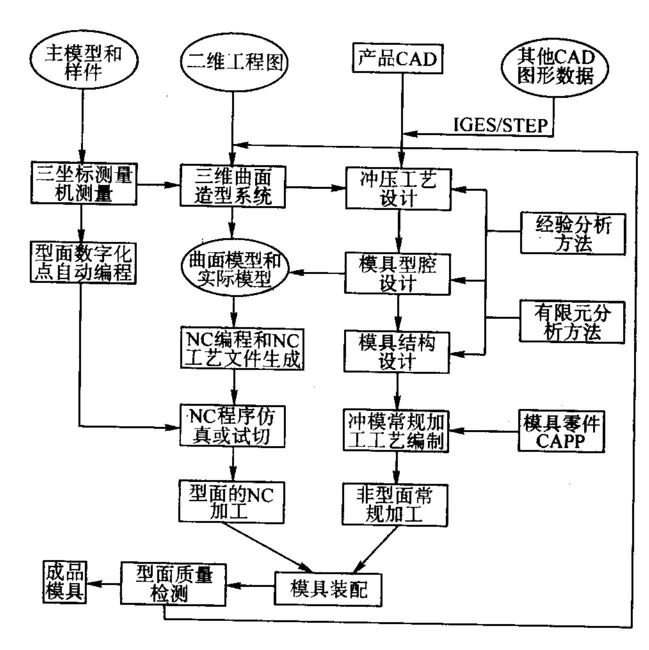


图 9.1-2　集成的汽车覆盖件模具 CAD/CAM 流程图

4 建立 CAD/CAM 系统的过程与方法

随着 CAD/CAM 技术的发展，软件系统的规模越来越大，复杂程度也越来越高。如果在建立 CAM 系统的过程中不遵循科学的方法，便难以保证所开发软件的质量。20 世纪 70 年代以来，软件开发已经由个体企业方式发展成为工程化，逐渐形成了一门新的技术学科——软件工程学。

根据软件工程学的方法，CAD/CAM 系统的生命期可分为系统分析、系统设计、程序设计、系统调试和系统维护等五个阶段。前四个阶段称为开发期，最后一个阶段称为维护期。

CAD/CAM 系统的生命期划分为上述五个阶段，这就为工程人员研制 CAD/CAM 系统提供了一个框架。但是必须指出，实际的系统研制工作不可能是直线进行的，常常存在着反复。研制人员往往需要从后面阶段回复到前面阶段，进行再分析或再设计。

下面对系统研制中各阶段的任务和方法做扼要说明。

（1）系统分析

系统分析阶段的主要任务是对现行的工作流程进行调查，收集并分析有关资料，了解用户的需求。在此基础上，



确定系统的总目标、功能、性能和接口，建立系统的总体逻辑模型。

数据流程图（Data Flow Diagram，简称 DFD）是系统分析常用的主要工具。它不但可以表达数据在系统内部的逻辑流向，而且还可以表达系统的逻辑功能和数据的逻辑转换。数据流程图既能表达现行的制造系统的数据流程和逻辑处理功能，也能表达 CAD/CAM 系统的数据流程和逻辑处理功能。

数据流程图的基本形式如图 9.1-3 所示。数据流程图中有四种基本符号，即外部项、数据流、处理逻辑和数据存储。

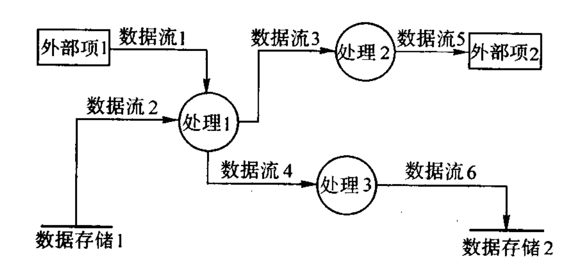


图 9.1-3　数据流程图的基本符号

外部项是不受系统控制的、在系统以外的事物或人，它表达了系统数据的外部来源或去处。外部项也可以是其他的 CAD/CAM 系统或信息处理系统，它向系统提供数据或接收系统输出的数据。在数据流程图中外部项用方框表示。

数据流在图中用箭头表示，指出了数据的流动方向。数据流可以由某一个外部项产生，也可以由某一个处理逻辑产生，或者来自某一数据存储。一般来说，对每一个数据流都要加以简单描述，并将这种描述写在数据流箭头旁。

数据流程图中的处理逻辑表达了对数据的逻辑处理功能，即对数据的变换功能。处理逻辑对数据的变换方式有两种：它可以变换数据的结构，例如将输入数据的格式重新排列；也可以在原有数据内容的基础上，产生新的数据内容，例如，在刀位文件的基础上编制数控程序。在图中，处理逻辑用圆圈表示，处理逻辑的功能描述一般由一个动词和名词组成，例如计算表面法矢等。通常，在数据流程图定稿后，需对每一个处理逻辑加以编号。

在数据流程图中，数据存储用直线段表示，它指出了数据保存的地方。这里所说的地方，不是指数据的物理地点，也不是文件、磁盘或磁带，而是对数据存储的逻辑描述，例如工艺方案、切削用量等。一个处理逻辑可以从数据存储中读取某些数据，也可以将一些数据存入某个数据存储中，甚至可以修改数据存储中的某些数据内容。

系统分析阶段的文档包括以下内容。

1）系统的目标。说明系统的目标，所需硬件、软件以及其他方面的限制。

2）信息描述。描述系统的输入和输出信息、系统与其他部分（硬件、其他软件、用户）之间的接口。

3）功能描述。描述系统的功能细节、功能之间以及功能与数据之间的关系。

4）质量评审要求。规定软件功能和性能的正式确认需求和测试限值。

需要强调的是，因为开发是为用户服务的，故在需求分析中应建立和保持与用户的联系，自始至终要争取用户的支持与合作。

（2）系统设计

过去，系统设计时利用系统流程图作为工具。系统流程图表达了系统的执行过程、输入/输出操作和有关的处理，也表达了数据在系统中的流向。但是，系统流程图无法表示系统的结构和每一模块的功能，因而无法评价系统是否符合用户的逻辑要求，也不可能知道系统的大小，以及是否易于维护和修改。

20 世纪 70 年代中期，结构化系统设计思想得到发展。所谓结构化系统设计，指的是用一组标准的工具和准则进行系统设计。其中，结构图是一个主要工具，用于表达系统内各部分的组织结构和相互关系。

用结构化的方法设计较复杂的 CAD/CAM 系统时，设计过程可分为概要设计和详细设计两个阶段。概要设计是在系统分析的基础上，确定软件系统的总体结构和模块间的关系，定义各模块间的接口，设计全局数据结构，确定系统与其他软件及用户之间界面的详细内容。详细设计主要是描述概要设计产生的功能模块，设计功能模块的内部细节，包括算法和数据结构。

结构化的系统设计强调“自顶向下”的分解，即将系统逐级向下分解成模块和子模块。在划分模块时，应尽可能地降低模块之间的耦合程度，增加每一模块的内聚性。模块间的耦合程度低，说明相互间的依赖程度低，模块的独立性好。模块间耦合程度越低，相互影响就越小，在修改一个模块时，可使修改范围控制在最小限度内；在对一个模块进行维护时，不必担心其他模块是否会受到影响。模块的内聚性指的是其内部各个部分的组合强度。一个模块的内聚性往往决定了它和其他模块之间的耦合程度。降低模块之间的耦合程度和提高模块的内聚性是两个相辅相成的设计原则。

图 9.1-4 所示为一结构图，结构图指出了系统由哪些模块组成，以及模块间的调用关系。模块用一个方框表示，模块的名称写在方框内。连接模块间的箭头，表示了模块间的调用关系。

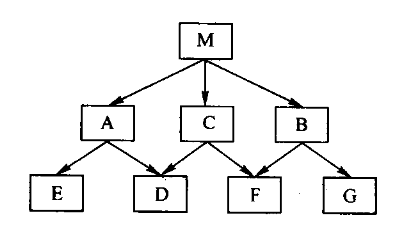


图 9.1-4　系统结构图

系统设计完成以后形成的文档资料是系统设计说明书。

（3）程序设计

程序设计阶段的主要任务是把系统设计方案加以具体实施，根据系统设计说明书进行程序设计，将功能模块用某种语言实现。系统结构图中的各个模块都有模块说明，内容包括模块名称、输入数据、输出数据和转换过程等，程序员根据模块说明的要求进行程序设计。

在系统开发的全过程始终贯穿着结构化技术。结构化程序设计是程序设计阶段的基本技术，其目的在于编写出结构清晰、易于理解、也易于测试的程序。

结构化程序设计指的是“用一组标准的准则和工具从事程序设计”。这些准则和工具包括一组基本控制结构、自顶向下的扩展原则、模块化和逐步求精的方法。

结构化程序设计理论认为，任何一个程序都可以用三种基本逻辑结构来编制。这三种结构是顺序结构、判断结构和循环结构（图 9.1-5）。这三种基本结构又促使人们采用模块化思想编制程序。一个系统（程序）可分成若干个功能模块，用作业控制语句或程序内部的过程调用语句将这些模块联结起来。

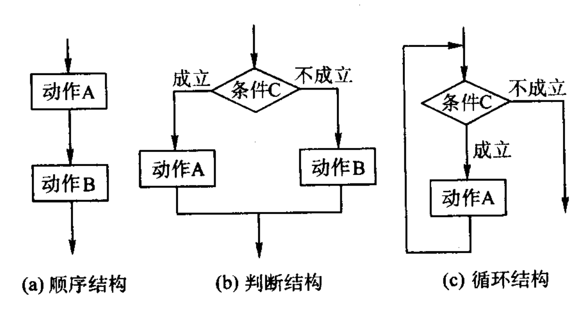


图 9.1-5　结构化程序设计的基本结构

自顶向下的程序设计，就是先把一个程序高度抽象，看作是一个功能结构。为了完成这个功能，需要进一步分解成若干较低一层的模块，实现一些较小的功能。如此逐步扩展，直到最低一层的每一个模块都非常简单，功能最小，能够很容易地用程序语句实现为止。

所谓逐步求精，指的是把一个模块的功能一步一步地分解成一组子功能，而这一组子功能可以通过执行若干个程序步来完成。自顶向下的程序设计过程只表达了各个功能之间的关系，却不能表达模块的内部逻辑。采用逐步求精的方法所分解出来的内部逻辑，即程序的执行步骤，能够完成预期的程序功能。

结构化程序设计方法可大大改进程序的质量，提高编程的效率，而且增强了程序的可读性和可修改性。结构化程序设计方法也便于发现错误和纠正错误，在修改程序的某一部分时，对其他部分影响不大。

(4) 系统测试

在开发 CAM 系统时，不可避免地会出现错误。系统测试是对系统分析、系统设计和程序设计的最后审查，是保证软件质量的关键。为了保证系统的可靠性，必须对系统进行尽可能完全的测试。因此，在有的系统开发中，测试的工作量占到整个开发工作量的 40%。软件测试和纠错是密切相关的两个问题，通常所说的调试，实际上包括测试和纠错两方面的工作内容。

在对系统进行测试时，通常按照以下原则进行：

1) 设计测试例题时，要给出测试的预期结果，以便做到有的放矢。

2) 为保证测试的质量，开发和测试小组分立。

3) 要设计非法输入的测试用题，保证程序能够拒绝接受非法输入，并给出提示信息。

4) 在对程序修改之后，要进行回归测试，以免由于修改程序而引入新的错误。

5) 在进行深入的测试时，要集中测试容易出错的部分。

测试所用的方法有两种：一种是黑盒法，一种是白盒法。

黑盒法着眼于程序的外部特性，而不考虑程序的内部逻辑结构。测试人员将程序视为一个黑盒子，不关心其内部结构与特点，只检查程序是否符合它的功能说明。

与黑盒法不同，测试人员采用白盒法测试时需要了解程序的内部结构，对程序的所有逻辑进行测试，在不同点检查程序的状态。

按照软件工程的方法，测试过程可分为单元测试、整体测试和有效性测试。单元测试即模块测试，就是对模块逐个进行测试，对模块的接口、数据结构、执行路径等方面进行考察。整体测试是将模块逐个装配在一起进行测试，其目的在于考察经过单元测试的模块，是否能组装成一个符合设计要求的系统。有效性测试的目的是证实软件的功能与用户要求是否一致，有效性测试一般采用黑盒法进行。

(5) 系统维护

CAM 系统生命期的最后一个阶段是维护阶段。系统的维护往往要消耗大量的精力和费用。系统维护的内容很广泛，但最主要是改正性维护、适应性维护和完善性维护。

软件测试往往不可能找出一个大型系统中所有潜伏的错误。所以，在系统使用期间仍有可能发现错误，诊断和改正这类错误的过程称为改正性维护。

由于计算机技术日新月异的发展，新的计算机硬件和操作系统新版本会不断出现。为了适应环境的变化，要对 CAD/CAM 系统进行修改，这类维护称为适应性维护。

当系统投入使用后，用户有时会提出增加新功能、修改已有功能或其他改进要求。为了满足或部分满足这类要求，要进行完善性维护，这类维护占系统维护工作的大部分。

如果仅有源程序，而缺乏文档资料，会因为软件结构、数据结构、系统接口和性能要求等方面不清楚，使维护工作十分困难。为了减少维护工作量，必须在系统开发过程中遵循软件工程方法，保证文档齐全，格式规范。

编写：李志刚（华中科技大学）



第 2 章　模具 CAD/CAM 系统的组成

1　模具 CAD/CAM 系统的硬件

典型的模具 CAD 系统的硬件设备包括主机、外部存储器、图形终端、输入设备和输出设备。这些设备的配置可用图 9.2-1 表示。

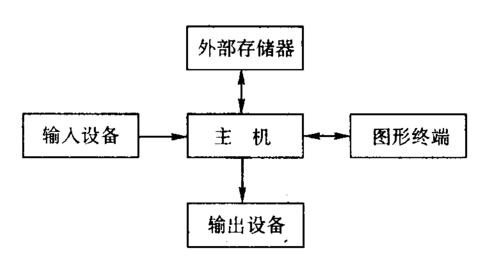


图 9.2-1　模具 CAD/CAM 系统的硬件配置

通常，将能与用户交互的计算机系统称为工作站。工作站包括为执行用户任务所需的全部设备。但是，有些设备，如打印机、绘图机和存储设备等，可由两个或多个工作站共享。

1.1　主机

主机是整个模具 CAD/CAM 系统的中枢，执行运算和逻辑分析任务，并控制和指挥系统的所有活动。这些活动包括内存和外存之间的信息交换、终端设备的管理和在绘图机上输出图形等。主机由运算器、内部存储器和控制器组成。运算器和控制器合称为中央处理机（CPU）。主机是整个模具 CAD/CAM 系统的核心，衡量主机的指标主要有三项：

1）运算速度。以 CPU 每秒可执行指令数目或可进行的浮点运算次数表示。常以 MIPS 为单位，即每秒可执行一百万条指令，或以芯片的时钟频率表示运算速度，时钟频率越高速度越快，80486 芯片为 60 MHz 左右，80586 芯片为 80～233 MHz，目前 PentiumⅣ芯片可高达 1.4 GHz。

2）字长。CPU 在一个指令周期内从内存提取并进行处理的数据位数称为字长。字长越多，计算机速度越快，计算精度也越高。字长取决于微处理器芯片的类型，如 80286 为 16 位，80386 及以上为 32 位，目前一般微机均为 32 位。

3）内存。内存容量越大，主机能容纳和处理的信息量也越大。一般微机的内存为 64 MB，高档微机的内存可达 256～512 MB，甚至更高。目前，高档微机由于体积小、价格便宜、具有较好的图形处理能力，已成我国大多数企业模具 CAD/CAM 采用的主要机型。

1.2　外部存储器

模具 CAD/CAM 系统使用外部存储器的目的在于扩大存储能力，弥补内存的不足。外部存储器可用于存储模具 CAD/CAM 系统的程序、图形文件和其他软件。在运行 CAD/CAM 的过程中，将所需的软件从外存调至内存使用，也可将内存的数据输至外存存放。常用的外部存储器有硬盘、软盘、光盘和磁带。

（1）硬盘

一个完整的硬盘存储器由驱动器（磁盘机）、控制器和盘片三部分组成，通过控制器和驱动器对盘片进行读写操作，实现数据的存取。硬盘含有多个盘片，其驱动器有多个读写磁头。反映磁盘工作性能的主要参数是硬盘存储容量、读写速度以及传输数据的速度。存取速度是指主机从硬盘读写数据的平均存取时间。它受多个因素影响，包括硬盘转速、寻道时间、外部传输速率以及硬盘驱动器内部机械结构的影响等。

硬盘通过控制器与 CPU 连接，对于不同的硬盘控制器及其接口，其数据传输速度差别很大，在微机上常用的接口有如下两种类型。

1）IDE 接口。IDE（Intelligent Drive Electronics）接口是微型机常用的标准接口，既可以控制硬盘驱动器，也可以控制软盘驱动器。IDE 技术分为普通型 IDE 和增强型 EIDE（Enhanced IDE）两种标准，后者在硬盘速度、容量等方面性能有所增强。

2）SCSI 接口。SCSI（Small Computer System Interface）是 1986 年推出的小型机和外部设备接口标准，是一种系统级的接口，可以同时接到各种不同设备的任何一种上，其数据传输速度比 IDE 接口快。SCSI 能减轻 CPU 的负担，提高高档微机的灵活性。

为提高硬盘存取速度，使用了高速缓冲存储器技术，另外，各制造商也在不断地研究新的接口技术。

总之，大容量、接口技术和存取速度是硬盘系统的三个技术特征。

（2）软盘

软盘存储器（简称软盘）与硬盘存储器的存储原理相同，但是在结构上存在一定差别。硬盘转速高，存取速度快，而软盘转速低，存取速度慢；硬盘是固定磁头、固定盘及盘组结构，软盘是活动磁头、可换盘片结构；硬盘磁头不接触盘片，软盘磁头是接触式读写；硬盘对环境要求苛刻，软盘对环境要求不高。软盘驱动器也是由驱动器、控制器和软盘片三部分组成，目前常用的软盘是 3.5 in 盘，容量大于 100 MB 的大容量的软盘也已经开始进入应用。

（3）光盘

利用光学方式进行信息读写，计算机系统中所使用的光盘存储器是从激光视频唱片和数字音频唱片基础上发展起来的，根据性能和用途不同，光盘存储器可分为三种类型：只读型光盘（CD-ROM），只写一次型光盘（WORM）和可擦写型光盘。

光盘存储器是计算机系统中一种先进的外存储控制设备。光盘驱动器也叫光驱，分只读光驱和可读写光驱，可读写光驱的工作方式与硬盘类似。

光盘的特点是容量大（每片光盘容量在 650 MB 以上）、可靠性高、信息存储成本低及随机存取速度快（与磁带机相比）。光驱、控制器和电源构成一个独立的光盘系统部件，该部件通过总路线接口与主机连接，并在主机操作系统管理下工作。

常用的光驱与主机接口标准有 AT、SCSI 与 IDE 等多种技术。目前，只读光驱已成为向硬盘安装软件及多媒体应用的常用设备。

（4）磁带

磁带存储原理与录音带和录像带相似，只是在规格和材料上有所不同，磁带存储的容量比较大，记录单位信息的价格比磁盘低，磁带的格式统一、互换性好，与各种类型机器连接方便，常用于系统备份，是主要的后备存储器。磁带存储器与磁盘存储器相比，磁盘存储器属于直接存取设备，只要给出信息所在的位置（即盘面、磁道、扇区），磁头就能



直接找到相应的位置并存取信息，而磁带存储器是顺序存取设备，磁带上的文件按顺序存放，只能顺序查找，信息存取时间比磁盘长。

需要说明的是，由于硬件技术的发展，过去插在扩展槽中的控制器结构大都集成到了计算机主板上，包括磁盘控制器、光驱控制器等多种输入/输出接口等。

1.3 输入设备

模具 CAD/CAM 的输入设备可分为键盘、光标控制设备、数字化仪、扫描输入设备。

(1) 键盘

键盘是一种最基本的输入设备，其主要功能是输入命令或数据。键盘上设有功能键和数字字符键。功能键通常由16至32个按键组成。这些按键可事先加以定义，使其对应于一定的功能。由于程序中已把这些键一个个地定义成某种功能，依据功能键进行操作时，按下某个键即意味着调用相应的子程序。数字字符键用以输入数字和字符。键盘和其他输入设备配合使用，可以实现人机对话，或修改、编辑字符和图形。

(2) 光标控制设备

鼠标是模具 CAD/CAM 中最常用的光标控制设备，用来控制屏幕上光标的位置，一般用于在显示屏幕上指示图形输入位置和点“菜单”。

鼠标有机械式和光电式两种。机械式鼠标在底部装有一个滚子，当它在平面上移动时，滚子也依靠摩擦力而随之移动，与滚子相啮合的机械装置就探测出移动后的 x、y 方向和距离，将该信息输入计算机后，就可控制屏幕上光标的位置。机械式鼠标必须在平滑的表面上移动，传送效率较低，准确性和精度较差，其优点是比较便宜。光电式鼠标在底座上有两只光电管，当光电式鼠标在一块特制的栅格形铅板上滑动时，光电管接受的亮度发生变化，决定了它相对移动的距离和方向，以此控制光标的移动。光电式鼠标传送速度快，精度高，但由于需配备专用平板，因而价格较贵。

鼠标结构简单，价格便宜，是模具 CAD/CAM 中最常用的输入设备。

触摸屏也是一种光标输入设备，所谓触摸屏是在普通的显示屏幕基础上，附加了坐标定位装置，一般是设置红外光源和对应的红外检测器。人眼看不见的红外线在屏幕上形成交叉，用来表示点的位置，当手指触摸屏幕时，通过相应的电路就可以检测到该点的位置。如将应用软件的菜单提示于屏幕上，利用触摸技术，用手指“点菜单”，既直观、又方便，不易出错。在模具 CAD 中，触摸屏技术应用较少，但它是一种更宜人化的交互处理方式。

除了鼠标和触摸屏外，光标输入设备还有手动轮、操纵杆与轨迹球、图形板和光笔等。由于鼠标键数的增加和功能的扩展，加之价格较便宜，在模具 CAD 中基本上是采用鼠标，而很少采用其他光标控制设备。

(3) 数字化仪

数字化仪是一种坐标输入设备，其工作原理和图形板相同，外形也相似，只是尺寸较大。高精度的数字化仪分辨率可达 0.02 mm 左右。数字化仪的电子跟踪设备可以记录所需点的 x、y 坐标，所以可用来输入图形上点的坐标。在要求不高的情况下，数字化仪可以完成图形的输入。应当指出，数字化仪并不是模具 CAD 系统必需的设备。它不能完成精确的图形输入工作。

(4) 扫描输入设备

图形扫描输入是将已有的图形（例如工程图）放置在图形输入板上，经过光电扫描转换装置的作用，即可把图形的像素特征，乃至几何特征输入到计算机中。这种输入方式在对已有的图样建立图形库方面有重要意义。

(5) 其他输入设备

语音输入设备是一种新型的输入设备，它允许人通过自然语言输入图形特征参数和属性参数，产生用户要求的图形。目前，这种设备尚未达到实用化和普遍应用的程度。

计算机图形设备发展的重要方向是输入设备的功能从 2D 发展为 3D，3D 输入设备包括三大类。

1) 3D 物体直接转变为 2D 图像。3D 扫描仪能直接扫描物体，典型的产品如美国 Kan Image 公司生产的扫描仪，称为 Kanscan，其过程为：在被扫描的物体的周围设置灯光照射。沿导轨驱动一个扫描头作二维运动，从而将物体变为一个彩色图像，如图 9.2-2 所示。

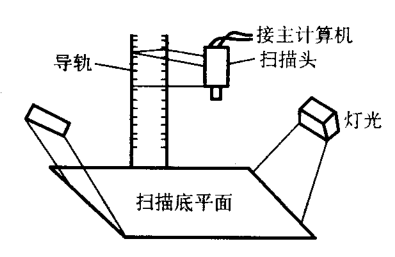


图 9.2-2 Kanscan 示意图

Kanscan 的分辨率最高可达 3 072 × 2 340。

另一种更为简单的设备是数字照相机，该相机所摄的图像可存储在外接硬盘上，也可直接输入到 PC 机进行处理。

2) 将 3D 物体转化为 3D 线框模型。这类设备是通过手动的方法将 3D 物体的表面结构（线框）输入到计算机，形成计算机的 3D 线框图模型，直接用于真实感表示。3D 数字化仪生成的文件可转化至 DXF，IGES，Warefront OBT 等标准或常用的格式，以便和 3D 造型软件接口。

3) 将 3D 物体自动转化为 3D 模型。3D 自动化数字化仪可自动地将 3D 物体的表面形状以及色彩的信息输入到计算机中，它利用激光和视频技术，能以极高的分辨率快速扫描 3D 物体，而不直接接触物体，因而无损于实际物体。经 3D 数字化仪扫描的物体，可将其数据传输到数控加工中心或快速成型设备上，从而可迅速地复制物体。

1.4 输出设备

1.4.1 图形显示器与图形显示卡

在模具 CAD/CAM 中，图形终端用于显示图形，也可用以显示字符。常用的三种阴极射线管（CRT）显示设备是向量更新显示器、直视存储管显示器和光栅扫描显示器。

作为显示器主要部件的阴极射线管内，装有电子枪，由它发射高速、精细聚焦的电子束。在阴极射线管的另一端是较为扁平的屏面，其上涂敷着一层荧光粉，当电子束轰击在上面时会发光。控制电子束的能量可以使输出光的亮度变化，需要时可以完全使光截止。流过偏转线圈的电流会使电子束偏转到屏面的各部分。阴极射线管的基本结构示于图 9.2-3。

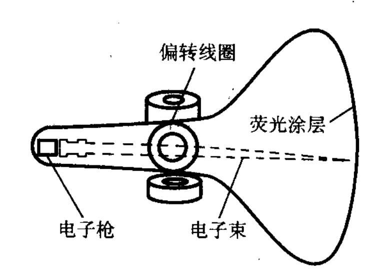
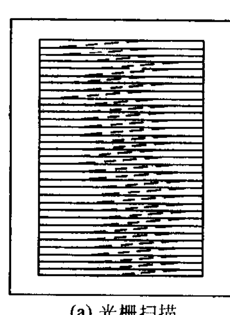


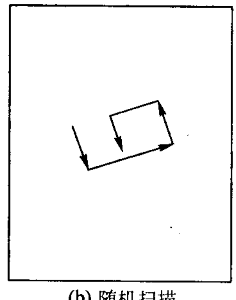
图 9.2-3 阴极射线管的基本结构



在 CRT 上显示图像的方法，按扫描方式大致可分为两种。第一种是普通电视所用的方法，通常是从左到右，从上到下在全画面上扫描。这种方法叫光栅扫描或 TV 扫描。在光栅扫描产生图像的方法中，屏幕被分成许多像素。这些像素形成了光栅点阵，光点数为（256 × 256）~（1 280 × 1 240），甚至更多。每个像素可有不同的颜色和亮度。第二种方法是把屏面分成纵横适当的格子，把格子点的坐标记入计算机内。当电子束根据计算机送来的信号向各坐标点处随机地移动时，该电子束的轨迹就形成所显示的图像。这种方法叫随机扫描或向量书写（图 9.2-4）。



(a) 光栅扫描



(b) 随机扫描

图 9.2-4　显示图像的两种方法

在电子束扫过 CRT 的表面后，荧光粉的光会迅速衰减，需要迅速并反复地扫描才能保持稳定的画面。向量更新显示器每秒钟更新整个图形至少 30 次，否则将产生闪烁现象。显示缓冲器把在阴极射线管上显示图形所需的全部指令按顺序存储起来。显示控制器按更新的速度周期地存取这些指令。很明显，向量更新显示器的局限性在于图形的复杂性受到显示缓冲器大小和显示控制器速度的限制。这种显示器的优点是图像的余辉时间短，有利于显示动态的画面。任何个别图形元素均可被改变、删去，或者增加新的图形元素，这样就实现了选择性删除的功能。

由于向量更新显示器成本高，且显示复杂图形时会发生闪烁，所以导致了具有存储图像能力的显示器的研制。这类显示器中，用得最广泛的是直视存储管显示器，此外还有等离子体显示板和激光扫描显示器等。

直视存储管也采用电子枪和涂敷了荧光粉的屏面。电子束不是直接写在荧光屏上，而是写在紧挨着屏、后面涂有介质的细网格栅极上。正电荷的图案沉积在这个栅极上，然后由读数电子枪发射的连续电子泛流将图案复制到荧光屏。图 9.2-5 为直视存储管的示意图。紧挨着存储栅极后面的是第二栅极（集电极），其主要作用是使电子泛流均匀分布。

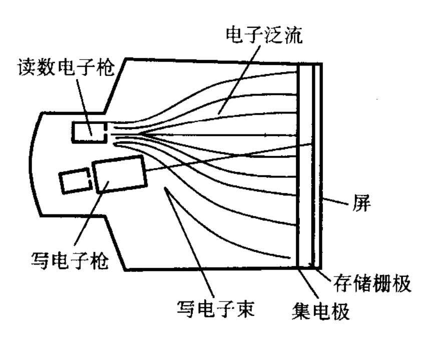


图 9.2-5　直视存储管的示意图

直视存储管显示器无需更新画面，因而可以显示稳定的无闪烁的复杂图形，这是它的优点。其缺点是不能作局部删除，不能作动态图形显示。

光栅扫描显示器采用光栅扫描方法产生图形。这些图形是由一连串的点组成的。在光栅扫描显示器上显示图形时，必须先将线条及字符信息转换为适合光栅显示的形式，这一过程叫做扫描转换。因为光栅扫描显示图形需存储每个像素的信息，所以需要较大的存储量。

绝大多数模具 CAD/CAM 系统是以交互方式运行的，设计人员可以利用交互设备输入命令，选择方案，修改设计。这就要求图形显示器具有选择性删除的功能。因为光栅扫描显示器显示图形的逼真性较好，价格也不甚昂贵，所以在模具 CAD/CAM 系统中得到广泛的应用。

图形显示卡也叫显示适配卡，简称显示卡，它通过总线与 CPU 和显示器相连，是 CPU 与显示器之间的接口，即视频控制电路。显示卡将显示缓冲存储器送出的信息转换成视频控制信号，用于控制显示器的显示。显示卡必须与显示器匹配，其性能好坏直接影响图形显示的速度及效果。显示卡大都制作成独立的卡插在主机扩展槽里，或集成到主板上的。

自 20 世纪 80 年代初以来，为增强图形显示功能，出现了带有图形处理功能的显示卡。这种卡既有高分辨率的显示控制功能，又有高性能 2D/3D 图形处理功能，减轻了对主机 CPU 处理图形的要求，使显示器图形显示功能大为增强。

区分显示卡的重要标志是图形分辨率、色彩及速度。彩色显示卡的缓存容量决定了图形的分辨率和它的色彩数，若要求分辨率高，色彩多，则显示卡的存储器容量也要大。当显示卡的存储器容量一定时，若要求的色彩越多，则存储每个像素色彩描述数据所需要的位数就越多，而显示像素的总数就要相应减少，从而分辨率也就降低。这也是同一块显示卡用于多彩色显示时图形分辨率低，用于少彩色显示时图形分辨率高的原因。

1.4.2　绘图设备

在模具 CAD 系统中，最常用的绘图设备是喷墨绘图机和笔式绘图机。另外，还有用静电或激光技术实现的绘图机。

(1) 笔式绘图机

笔式绘图机可分为卷筒式和平台式两类。

卷筒式绘图机靠笔在横梁上的运动和卷筒带动绘图纸的运动，完成线条的绘制。卷筒式绘图机价格便宜，绘制的图形不受长度的限制，绘制图形的质量也比较好。

平台式绘图机可以绘制精度较高的图形。笔的运动步距可达 0.001 mm，这已远远超过一般应用的要求。不同颜色的笔装在笔架上，需要时可以从固定位置取出。常用的固定纸的方法有静电吸附、真空吸附或者机械压紧。一般绘图机都装有微处理器，给操作者以附加的控制，如定比例、控制速度等。

平台式自动绘图机的台面可平放或斜置，所以称为平台式自动绘图机。它的台面可以做得很大（如 3 000 mm × 10 000 mm），绘图速度较高，为 15 ~ 60 m/min 左右。平台式自动绘图机精度高，综合精度约为 ± 0.15 mm，重复精度可达 ± 0.01 mm。平台式绘图机在绘制图形时能看到整个画面，便于监视绘图过程。平台式自动绘图机常采用步进电机、伺服电机、平面电机等驱动方式。图 9.2-6 为平台式自动绘图机的结构示意图，主要包括如下几个部分。

1) 驱动电动机。将计算机传来的脉冲信号转换为机械运动。

2) 机械传动系统。通过机械传动系统，将驱动电动机的转动变为绘图笔的运动。常用的传动方式有滚珠丝杠、齿轮齿条、钢丝钢带等。高精度的滚珠丝杠，由于在丝杠和螺母之间放置滚珠，摩擦小，传动效率很高，不易发生爬行现象。它适合于位移小、定位精度要求高的自动绘图机。因为



细长丝杠加工较困难，所以滚珠丝杠传动多用于中小型绘图机。小模数齿轮齿条传动适用于大型绘图机。钢丝绳滑轮传动的优点是传动惯性小，可实现高速绘图，但是钢丝绳易损坏，常需更换。

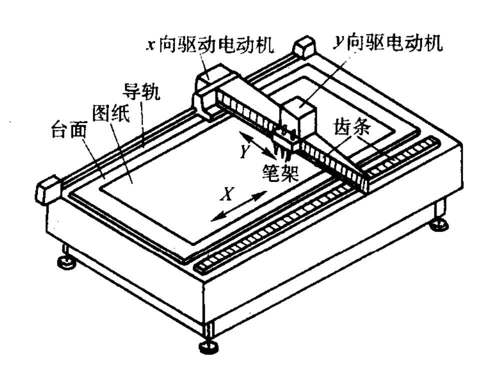


图 9.2-6　平台式自动绘图机的结构

3）笔架。笔架上装有数支绘图笔，可用以绘制不同颜色、不同粗细的线条。根据指令可使所需的笔移到相应位置。笔的上下运动是按照指令由电磁机构完成的。在高速绘图中笔的上下动作非常频繁，因此笔座的惯性是一个重要问题。此外，笔的急速运动会在纸面上产生跳跃和断线现象。对使笔上下运动的线圈电流进行控制，可使高速下降的笔在接触纸面之前减速。

4）图纸固定装置。常用的图纸固定装置有静电吸附、真空吸附、机械夹紧等类型。静电吸附的原理如图 9.2-7 所示，金属基板上覆盖着感应导电层，在其表面上制有网格状的电极。由于电极接地，所以与其相接触的图纸也具有相同的地位。当将正电位加于金属基板后，图纸便被吸附固定。这种吸附方式无噪声，耗电量少，但对周围环境要求较高。采用真空吸附的方法固定图纸时，绘图台面上有许多小孔。当真空泵在台面下抽气时，图纸便会紧密地吸附在台面上。

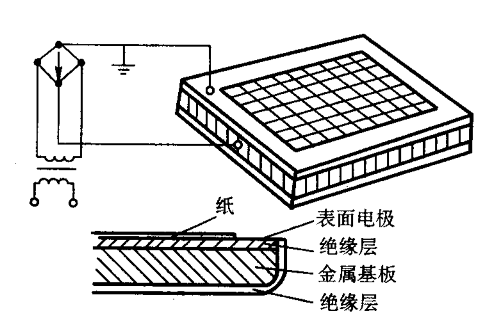


图 9.2-7　静电吸附固定图纸的原理

5）插补器。它可对直线、圆弧和抛物线进行插补运算，输出 x、y 方向的位置指令脉冲。插补器还有改变图形比例，控制速度，选择绘笔，控制抬笔、落笔以及强制绘笔自动到达终点等作用。

卷筒式绘图机因利用卷筒带动图纸作 x 方向运动而得名。图纸的卷动配合笔架的移动和绘图笔的抬上、落下运动，便可绘制出所需的图形（图 9.2-8）。这种绘图机与平台式绘图机相比具有结构简单、占地面积小、纸长几乎不受限制等优点，但绘图精度较低。然而，由于其结构简单、价格低廉，所以它在绘图精度要求不高的场合应用十分广泛。小型的卷筒式绘图机一般称为 $x-y$ 绘图仪，可直接放置在桌面上。卷筒式绘图机多采用开环控制系统，由步进电机驱动。绘图速度决定于脉冲频率，绘图精度则取决于脉冲当量（步距）。卷筒式绘图机主要由下列部分组成：

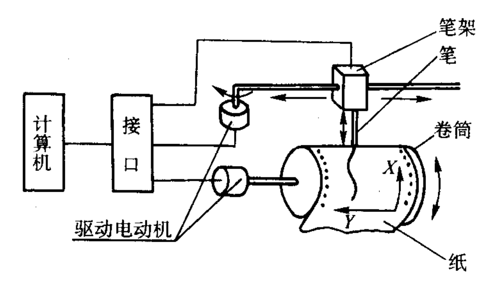


图 9.2-8　卷筒式自动绘图机的结构

1）步进电动机　将计算机送来的脉冲信号转换为机械运动，驱动卷筒和绘图笔。

2）卷筒传动机构　由送纸电动机、卷纸用带轮和 x 向步进电动机组成。送纸时，由送纸电动机用传动带带动卷筒。绘图时，用 x 向步进电动机驱动卷筒。有些公司，例如 HP 公司和 HI 公司，生产的绘图机采用摩擦轮驱动图纸。这是对卷筒绘图机卷纸机构的改进。此类绘图机已得到广泛应用。

3）绘图笔移动部分。y 向步进电动机通过小模数齿轮带动钢带，使笔架左、右运动。笔架上的滚轮沿导轨滚动，轻便灵活。

4）控制台部分。其上安装有进行各种操作的按钮，包括启动、调整、停止等操作。

（2）喷墨绘图机

喷墨绘图技术是利用特制的换能器将带电的墨水泵出，由聚焦系统将墨水滴微粒聚成一条射线，再由偏转系统控制喷嘴在打印纸上扫描，并附着在图纸上形成浓淡不一的各种单色或彩色图形、图像及文字符号。它具有清晰度高、工作可靠、噪声小、价格低及容易实现不同浓淡的彩色图形与图像等优点。小型喷墨绘图机常用于输出小张图形和文稿，又称喷墨打印机。大型喷墨绘图机可用于输出设计图样，一般有平板式与滚筒式两种，其机械控制原理与笔式绘图机相似。喷墨绘图机也有单色型与彩色型。喷墨绘图机绘图速度比笔式绘图机快，但其耗材成本较高。

随着喷墨绘图机价格的降低，目前已成为企业 CAD 中使用的最主要的绘图设备。

（3）硬拷贝机

这种设备可以将显示在屏幕上的图形复制下来，作为设计过程中间步骤的记录。图纸的尺寸一般限制在 215～280 mm。因为图形终端分辨率的限制，显示的图形质量远不如绘图机上绘制的图形。所以，用它的复制品作为最终的图样是不适合的。常见的硬拷贝机的工作原理是电子摄影技术，所用的拷贝纸不但价格贵，而且在正常光线的长时间作用下会变暗。

2　计算机网络

计算机网络是计算机和通信技术相结合的产物。它利用通信设备和线路将地理位置不同、功能独立的多个计算机连接起来，以实现网络中的信息传递与资源共享。计算机网络按其连接位置的远近分为局域网（LAN）和广域网（WAN）。局域网将计算机与外围设备互联，使用户可以通信、共享资源，如数据库、打印机和绘图机等，还可访问其他计算机或其他网。广域网由远程线路，如电话交换网、公用数据网和卫星等，将地理不同的两个或多个局域网连接起来。用于网络互联的设备有以下几种。

（1）网络适配器（NETWORK ADAPTER）

网络适配器又称网络接口卡或网卡。它在计算机管理下，按着某种约定协议，将计算机内信息保存的格式与网络线缆发送或接收的格式进行双向变换（一般是借助共享内



存，在系统内存和网卡内存之间进行数据信息交换），控制信息传递及网络通信。网卡是网络通信的瓶颈之一，其质量和兼容性的好坏直接影响网络的功能，只有优质、可靠的网卡才能真正保证网络工作的可靠与高效。

(2) 传输介质

用于网络传输的介质主要有以下三种。

1) 双绞线。双绞线分屏蔽双绞线 STP（Shielded Twisted Pair）和非屏蔽双绞线 UTP（Unshielded Twisted Pair）两种。屏蔽双绞线由两股彼此隔绝、绞在一起的高质量铜质线构成，绞线外面有绝缘层，这种双绞线信号辐射小，具有较高的特性阻抗，对干扰和串音有一定的抵抗力。非屏蔽双绞线没有特殊的绝缘层，它由数对细的绞线及外部绝缘套构成，四对（8根细线）非屏蔽双绞线既可用于电话系统，也可用于计算机网络，是网络互联常用的介质。

2) 同轴电缆。同轴电缆由内部铜导线、中间绝缘层、用作地线的屏蔽层及外部保护皮围裹组成，一般分粗同轴电缆和细同轴电缆两种。用于连接客户计算机常见的电缆是细同轴电缆，常称为"细缆"，其优点是支持宽带和基带通信，适于传递数据、声音、图像信号，安装方便。

3) 光缆。光缆由折射率不同的内芯和外芯光导纤维组成，光导纤维封装在防护缆中。这种用光载信号进行传送的形式，具有抗磁干扰能力强、安全可靠、保密性好、在高速率和远距离传输信号时衰减小等优点。

(3) 调制解调器（MODEM）

调制解调器用于将数字信号转变成模拟信号或把模拟信号转换为数字信号，是拨号上网的必需接口设备。

从应用上说，借助网卡、调制解调器及传输介质就可以组建成局域网。为提高网络性能，保证在局域网内、局域网之间或不同网络之间能够有效地传输信息，在组建计算机网络时，一般还要根据具体情况选用中继器（Repeater）、集线器（HUB）、网桥（Bridge）、路由器（Router）、网关（Gateway）等互联设备。

网络上设备之间的拓扑结构分为以下几种类型。

1) 总线型：所有设备连接到干线电缆。

2) 星型：所有设备连接到一个点，即网络中的集线器（HUB）。

3) 环型：所有设备串行连接，构成一个环。

实际的网络连接是上述三种模式的混合型。

图9.2-9所示为某企业的一个网络连接图，将不同的部门组成一个局域网。其中由一台交换机连接企业内各部门，

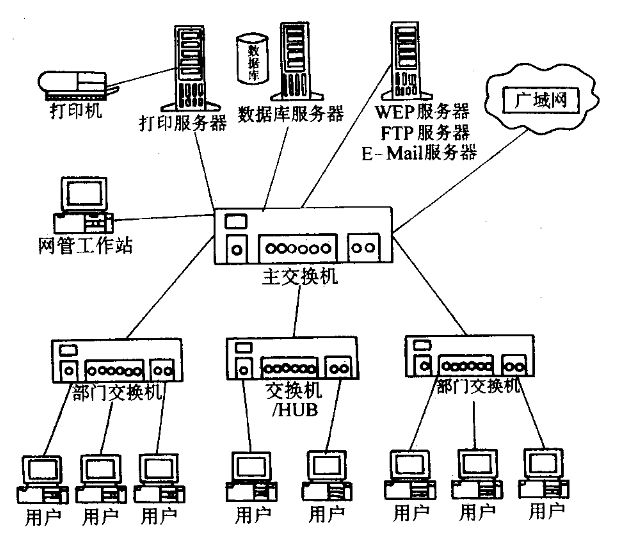


图9.2-9 某企业网络系统的拓扑连接图

根据计算机终端数可用交换机或集线器（HUB）连接，各部门和主交换机用光缆连接，部门内部采用标准双绞线相连。主体网络协议采用 TCP/IP，能够支持异种机互联，支持分布式数据库系统，并提供文件传输，虚拟终端，电子邮件传输等网络服务功能。网络的 Internet 出口经过防火墙控制，以保证网络的安全。

在模具 CAD/CAM 中，利用计算机网络，可以共享设计资源，共同完成复杂的模具设计任务。所以，基于网络的系统是模具 CAD/CAM 系统的发展方向和必然趋势。

3 模具 CAD/CAM 系统的软件

模具 CAD/CAM 系统除必要的硬件设备外，还必须配备相应的软件。如无软件的支持，硬件设备便不能发挥其作用。软件是决定模具 CAD/CAM 系统功能强弱、效率高低和使用是否方便的关键因素。在购置模具 CAD/CAM 系统时，软件部分的投资往往超过硬件部分的投资。

模具 CAD/CAM 系统的软件多种多样，其作用亦各不相同。一般说来，模具 CAD/CAM 的软件可分为系统软件、支撑软件和应用软件三类。

3.1 系统软件

系统软件指的是在计算机运行状态下，保证用户正确而方便地工作的那一部分软件，包括操作系统、汇编系统、编译系统和诊断系统等。

操作系统是用户和计算机之间的接口，使用户能有效地使用计算机。操作系统全面管理计算机资源，合理地组织计算机的工作流程。操作系统的管理包括 CPU 管理、存储管理、文件管理、输入输出管理和作业管理等。操作系统是每一计算机系统都具有的系统软件。

20世纪80年代以来，窗口软件得到了较大的发展。以集成操作环境为特点的窗口系统，被誉为新一代操作系统。

窗口管理系统的特点是：①在同一屏幕上支持多个窗口，窗口可互相重叠，并可输出不可见窗口的内容。②一个应用程序可用同一屏幕上的多个窗口，在不同的窗口上可执行多个应用程序。③可在多种显示器上执行，使应用程序与设备无关。④具有集成化的操作环境和统一的用户界面，操作系统本身就是窗口化的。⑤窗口系统具有网络透明性，即可在操作系统和系统结构都不同的计算机上运行应用程序。

目前，在微机上运行的窗口管理系统中，比较常用的有 MS-Windows 和 Macintosh 等。在分布式系统和工作站上最流行的窗口管理系统是 X-Window。

在开发模具 CAD 系统时，还需要用到编译系统和汇编系统。编写应用程序是模具 CAD 开发人员的一项经常性的工作，程序设计语言是必须掌握的基本工具。在模具 CAD 中常用的高级语言有 C 和 C++ 语言。

3.2 支撑软件

支撑软件是模具 CAD/CAM 系统的核心，它为用户提供工具或开发环境。支撑软件包括以下几种类型。

(1) 图形处理软件

图形软件是模具 CAD/CAM 系统的重要支撑软件，它可使用户在屏幕上建立和修改图形，在绘图机上输出图形。

图形软件按应用范围可分为二维图形软件和三维图形软件。常用的二维图形软件包的基本功能如下。

① 产生各种图形元素，如点、线、圆等。

② 图形变换，如放大、平移、旋转等。

③ 控制显示、开窗口、局部放大。

④ 局部删除图形元素，修改、编辑图形。

⑤ 输入和输出功能。

除上述基本功能外，二维图形软件包提供的功能还有尺寸标注、书写文字、画剖面线等。

由于计算机和图形设备发展迅速，更新换代速度很快，图形软件的开发需要耗费大量的人力物力，如果图形软件随硬件的变化而修改，不仅非常困难，而且也是极大的浪费。为了使图形软件能够方便地在不同计算机和图形设备之间移植，国际标准化组织（ISO）制定了一些图形软件标准。美国等一些国家的标准化机构也都研究和制定了一些标准。按照图形软件标准的功能可分为三个层次：数据交换接口标准、图形系统标准和图形设备接口标准。

数据交换接口公认的方法是基于标准中性文件格式的间接交换方式。目前发展形成了多种标准数据交换文件，如美国的 IGES（Initial Graphics Exchange Specification 原始图形交换规范）、德国汽车工业协会制订的 VDA-FS、法国宇航公司提出的 SET 以及美国 ANSI 拟定的 PDES 和国际标准化组织 ISO 制定的 STEP（Standard for the Exchangeof Product Model Data）等。其中最常用的标准是 IGES 和 STEP。

图形系统标准包括 GKS、GKS-3D 和 PHIGS。

GKS（Gaphical Kernel System——图形核心系统）是一个为应用程序服务的基本的图形系统，它提供了一组用于计算机图形程序设计的功能函数集合，是最早颁布的国际图形标准，其目的是提高应用程序的可移植性。

GKS 在应用程序和图形输入输出设备之间提供功能接口，它包括一系统交互和非交互式图形设备的全部基本图形处理功能，大致可分为以下 10 类。

1）控制功能：执行打开、关闭 GKS，以及使用工作站进入或退出活动状态和删除工作站等。

2）输出功能：确定输出图形的类型。

3）输出属性：设定图素的各种属性以及各种图素在工作站上的表现方式。

4）变换功能：实现规范化变换和工作站变换。

5）图形功能：对图形进行生成、删除、复制以及实现图组属性控制。

6）输入功能：对各种输入设备初始化、设定设备方式、确定请求、采样和事件输入。

7）询问功能：查询 GKS 描述表、状态表、出错表、工作站描述表和图素表等，查找 GKS 状态值、级别、工作站类型、状态以及描述表和图组状态等内容。

8）实用程序：实现坐标变换等。

9）元文件处理。

10）出错处理。

GKS-3D 是一完全的三维系统，即其所有的操作都是在三维情况下进行的。GKS 中的二维操作只是 GKS-3D 的一个简化形式。GKS-3D 中的所有图段、图素数据均是三维格式，即使原来的 GKS 中是二维的数据，也要转变成三维的格式。GKS 和 GKS-3D 在功能上可以混合使用，比如可用 GKS 定义一个平面，然后把它转换到三维空间中去，用 GKS-3D 对它进行各种处理。GKS-3D 的功能包括三维图素、填充区域图素集、具有视图操作的三维变换、三维输入、隐藏线、面消除、边界的属性和三维几何属性。

PHIGS（Programmer's Hierarchical Interactive Grahics System）是 ANSI 于 1986 年公布的计算机图形软件系统标准，1988 年成为 ISO 标准。PHIGS 为应用程序员提供了控制图形设备的图形软件系统接口。PHIGS 的图形数据按照层次结构组织，使多层次的应用模型能方便地利用 PHIGS 进行描述。PHIGS 还提供了动态修改和绘制显示图形数据的手段。

PHIGS 的标准功能可划分为 9 个程序模块来分别实现，各模块相对独立，一个模块仅通过系统的公共数据结构与其他模块间接连接，其结构如图 9.2-10 所示。

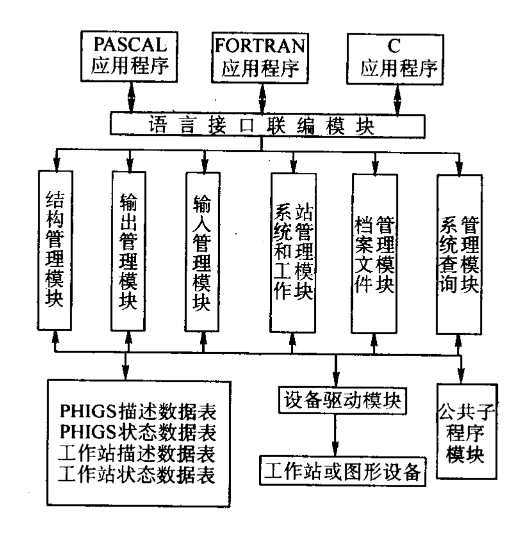


图 9.2-10 PHIGS 程序模块结构

图形设备接口标准有 CGI 和 CGM。

CGI（Computer Graphics Interface——计算机图形接口）是 ISO TC97 提出的图形设备接口标准。CGI 的目的是提供控制图形硬件的一种与设备无关的方法，使用户最大限度地、灵活地控制图形设备。实际上，CGI 也可看作是图形设备驱动程序的一种标准。CGI 有五部分功能，即控制查询及出错处理、输出图素及其属性、图段定义及处理、输入及响应处理和光栅处理。CGI 所定义的接口功能需以高级语言编程实现。

CGM（Computer Graphics Metafile——计算机图形元文件）是 ANSI 于 1986 年公布的标准，1987 年成为 ISO 标准。它是一套与设备无关的语义、词法定义的图形文件格式。CGM 标准主要由两部分组成，其一是功能规格说明，以抽象的词法描述了相应的文件格式；其二是描述了元文件词法的三种形式的编码。

OpenGL 是在 1992 年由 SGI 公司为首，联合 IBM、Intel 等 8 家公司共同制定的。OpenGL 是一个图形硬件的软件接口。OpenGL 实际上是一个三维图形和模型库。它最大的特点就是与硬件无关，可以在不同的硬件平台上移植。由于它在三维真实感图形方面具有优秀的性能，已被绝大多数显示卡生产商作为标准采用，可以说 OpenGL 是新一代三维图形工业标准。OpenGL 为程序开发人员提供了大量的基本图形操作函数，包括几何建模、变换、渲染、光照和材质、混合、雾化、位图和图像、纹理映射、交互操作和动画。

（2）几何造型软件

几何造型软件是用于建立物体几何模型的软件。利用其造型功能，可以定义物体的几何形状及其相互关系，在计算机内建立的几何模型可为设计、图形显示和 NC 编程等方面提供必要的信息。要实现模具 CAD/CAM，首先必须完成产品零件的几何造型，建立产品零件的模型，后续的一切处理和操作皆在此模型的基础上完成。因此，几何造型软件是模具 CAD/CAM 系统必不可少的支撑软件。

按照产生的几何模型的不同，几何造型方法可分为线框造型、表面造型和实体造型，产生的模型分别为线框模型、表面模型和实体模型。目前，有些造型软件可以产生上述三种模型，并可使之相互转换。这种集成化的造型软件增强了几何造型的功能，扩大了其应用范围。

20 世纪 80 年代以来，特征造型技术成为人们研究的一个热点，其目的是提供一套完整地描述物体特征信息的方法，为实现 CAD/CAM 的集成创造更有利的条件。利用特征造型技术可定义零件的形状特征、精度特征、材料特征和其他工

艺特征，从而可为计算机辅助工艺设计（CAPP）提供所需的信息。特征造型软件发展很快，功能也越来越完善。

（3）数据库系统软件

模具 CAD/CAM 过程是一个信息分析、处理和传递的过程。在模具设计过程中需要对大量的数据进行处理和操作。这些数据中有静态的数据，如标准设计数据、标准图形文件等，也有动态的数据。动态数据主要用于描述设计结果和用于各子系统之间的信息交换。数据管理是模具 CAD 中的一个非常重要的问题。设计、查询、对话和图形显示等项活动都和数据库有着密切的关系。

有些模具 CAD/CAM 系统利用操作系统的文件管理功能管理设计过程中的数据。各种标准数据均以数据文件形式存放在磁盘上；各模块之间的信息交换也利用数据文件。

使用文件系统管理信息的优点是简单易行，只要利用操作系统的功能就可以实现，不需要附加的管理软件。但是，文件系统的缺点是不能以记录或数据项为单位共享数据，导致数据的大量冗余，增加新数据和删除旧数据都很困难。为克服这些缺点，人们发展了数据库技术。

采用数据库系统管理设计数据时，数据按一定数据结构存放在数据库中，由数据库管理系统（DBMS）统一管理。数据库管理系统提供了各种管理功能，例如存放数据、删除数据和查找数据等。利用数据库管理系统的命令，可以完成各种数据操作。

数据库系统有如下优点：

1）编制应用程序时可以不必考虑各种标准数据的管理。

2）数据独立于程序，数据存储结构的变化不会影响应用程序。

3）减少了数据的冗余，提高了共享程度。

4）保证了数据的一致性。

5）便于修改与扩充。

3.3 应用软件

应用软件是在模具设计制造过程中用于特定目的的软件，例如冲裁模设计软件、注塑模设计软件和数控编程软件等。编制应用软件的过程就是将模具设计和制造工艺设计算法化、程序化的过程。在开发的过程中，需要建立数学模型，用计算机可以处理的方式表述设计准则。

目前，绝大多数模具 CAD/CAM 系统为交互式系统。交互式的模具 CAD/CAM 系统必须允许用户能方便地输入数据、选择功能，因而需要有一个用户界面。友好的用户界面可以使系统易学易用，不仅能提高工作效率，而且可减少错误率。

菜单作为用户界面的一个重要方面，在交互式的模具 CAD/CAM 系统中作用十分显著。用户通过点菜单可以完成输入命令和参数、动态编辑图形等工作。菜单按照在屏幕上的出现方式，可分为固定式菜单、下拉式菜单、弹出式菜单和翻页式菜单等类型；根据菜单项目的表达方式，又可分为文字菜单和图形菜单。

通常，将屏幕分为四个区，图 9.2-11 所示为一种分区布置方式。工作区用来显示图形和其他工作内容；菜单区用以显示可供选择的菜单项目；状态区用以显示光标点的坐标值和其他状态信息；交互区显示用户输入的命令和参数。

菜单项目的位置一般由所在区域的左上角和右下角点的坐标定义。当用户利用图形交互设备将光标移至此区域，即表明选择此项目，控制程序便会调用相应的功能子程序。

当模具 CAD/CAM 作业采用菜单驱动时，要调用的功能项目很多。以图形编辑为例，作图时需要有画点、画直线和画圆等功能。画圆弧时又可以采用不同的方式，如起点、终点和圆心方式，起点、圆心和夹角方式等。这些功能在逻辑上是从属关系，与此对应的是分级菜单系统，如图 9.2-12 所示。主控程序首先显示主菜单，然后根据操作过程中光标击中的位置，显示不同级别的子菜单。

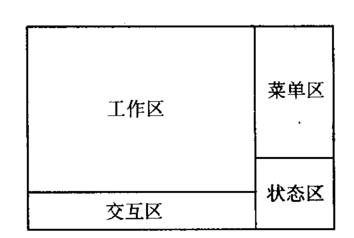


图 9.2-11 屏幕的分区布置

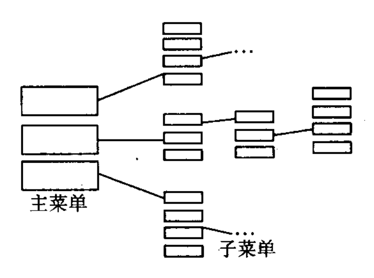


图 9.2-12 分级菜单

和开发其他软件系统一样，提高软件的开发效率和可靠性是模具 CAD/CAM 系统开发中的一个重要问题。为了解决这一方面的问题，人们提出了计算机辅助软件工程（CASE: Computer Aided Software Engineering）的概念，并开发了一些 CASE 工具。利用 CASE 软件工具可以提高程序设计和调试的效率，大大减少错误率。

为了提高应用软件的开发效率，常将实现系统基本功能的算法程序建成程序库（又称方法库）。在开发应用程序时，可以直接调用程序库中的通用程序。

例如，可将常用的计算程序，如矩阵基本运算、解线性方程组、微分方程求解等程序存放在程序库中。应用程序可按系统规定的方式调用这些程序。

编写：李志刚（华中科技大学）

第 3 章 数据处理方法

在模具设计和制造工艺设计中，只有为数不多的设计准则和规范是以公式表达的，大量的则是以数表和线图的形式给出的。在建立模具 CAD/CAM 系统时，必须将这些数表和线图以计算机能处理的方式表达。

模具 CAD/CAM 的过程就是信息处理的过程，包括信息的输入、产生、转换、存储和输出等方面。通常，模具 CAD/CAM 系统的程序规模很大，结构相当复杂。要提高系统的效率，不仅涉及到程序的结构和算法，同时也涉及数据结构与管理方法。在应用程序的执行过程中，经常需要利用一些标准数据或其他程序的运行结果，系统各部分是通过交换数据相互联系的。因此，数据管理在模具 CAD/CAM 中的作用十分重要。为此，需要用到数据结构、文件系统等软件技术。

1 常见的数据结构

1.1 数据结构分类

在模具 CAD 系统中，设计数据和设计结果要用具体的数据结构来表示。数据结构指的是数据之间的结构关系，它包括数据的逻辑结构和物理结构。

(1) 数据的逻辑结构

数据的逻辑结构描述的是数据之间的逻辑关系，它从客观的角度组织和表达数据。通常可将逻辑结构归纳为线性结构和非线性结构两大类型。

1) 线性结构。这种结构的数据可以用数表的形式表示。数据间的关系比较简单，只是顺序排列的位置关系，而且这种位置关系是线性的，因而又称这类数据为“线性表结构”。BASIC、FORTRAN、C 等各种算法语言中的数组都是这种结构。在这种结构中，每一个数据元素仅与它前面的一个和后面的一个数据元素相联系，因而能用以表达数据之间的简单顺序关系。

2) 非线性结构。这种结构的数据间逻辑关系比较复杂，数据元素之间的关系是一种多元关系，例如树状结构和网状结构都是非线性结构。

(2) 数据的物理结构

数据的物理结构指的是数据在计算机内部的存储方式，它从物理存储的角度描述数据以及数据间的关系。常用的物理结构有顺序存储结构与链接存储结构两种。

1) 顺序存储结构。即用一组连续的存储单元依次存放各数据元素。例如一维数组在存入计算机时，各数据在存储器中的存储顺序与逻辑顺序一致，也为依次排列。这种存储方式占用存储单元少，简单易行，结构紧凑。但数据结构缺乏柔性，增加和删除数据项时，要重新分配存储单元，重新存入全部数据，因而适合不需要修改、补充、删除数据的场合。

2) 链接存储结构。在链接存储结构中，一个数据元素项由信息字段和指针字段组成，如图 9.3-1 所示。数据存储在信息字段，而指针字段中存入下一个数据元素项的地址，根据信息段逻辑关系的复杂程度，在指针字段可设置一个或多个指针，从而建立起数据元素项之间的联系。通过各种指针，可构成不同的存取路径，以适应逻辑结构的需要。因而存储结构独立于逻辑结构，它使存储的物理顺序不必与逻辑顺序一致，且仍能按逻辑要求来存取数据。

链接存储结构根据指针的数目大致有三种类型。

① 单向链结构。各个数据元素通过指针构成一个链状结构，且链接方向单一。单向链结构根据其链接方向是否与逻辑顺序一致又可分为正向链和反向链（见图 9.3-2a、图 9.3-2b）。若将最后一个数据元素与第一个数据元素通过指针链接，则成为环链结构（图 9.3-2c）。

INFO	POINT

图 9.3-1 链接存储数据字段组成

② 双向链结构。双向链结构中有两个指针，分别按正、反两个方向链接（见图 9.3-2d）。双向链也可以构成环链（见图 9.3-2e）。环链结构的特点是存取时可从环的任何一个数据元素入口，按指针逐个存取各个记录，直到再遇到入口记录为止。对于双向环链结构，可以自入口处按较短路径的方向存取记录，提高存取效率。当某个指针因意外而损坏时不致影响整个结构，且易修复。

③ 多向链结构。结构中有多于两个的指针（见图 9.3-2f）。通常用于矩阵元素、树结构存储，只要查询到某一元素，即可获得相邻的、相关元素的地址。

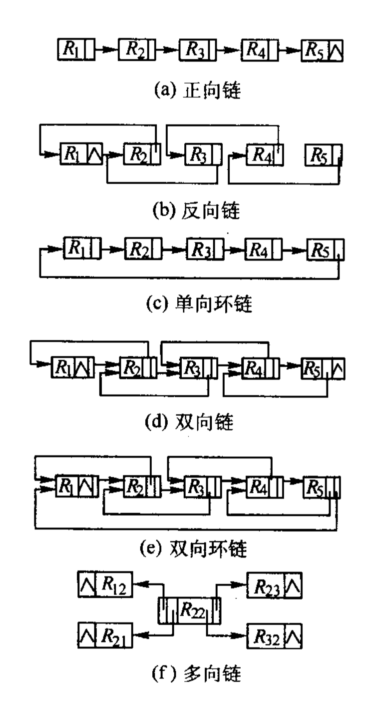


图 9.3-2 链接存储结构类型

上述链接存储结构在不改变原来存储结构的条件下，增删记录十分方便。如图 9.3-3 所示，只要将插入项前一个记录的指针指向插入项，而插入项本身的指针指向后一项即完成插入。同理，将删除项前一个记录的指针指向删除项后一项即完成删除。该结构还为数据检索，尤其是非线性结构的数据检索提供了便利条件，但链接存储相对于顺序存储结构而言，需要较大的存储空间。



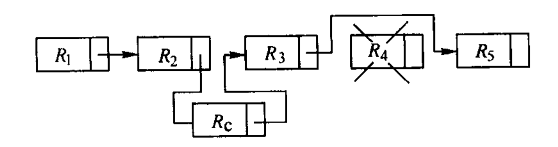


图 9.3-3　链接存储结构的记录增删

1.2　常用数据结构的分析

常用的数据结构有以下 7 种。

(1) 线性表

线性表是一个由 n ($n \geqslant 0$) 个数据元素 a_1，a_2，a_3，…，a_n 组成的有限序列，并且用一个整数标号（亦称下标）标志线性表中的各元素。线性表逻辑上可表示为：

$$(a_1, a_2, \cdots, a_{k-1}, a_k, a_{k+1}, \cdots, a_n)$$

线性表是一种最简单、最常见的数据结构，其特点就是数据元素之间呈线性关系。线性表的物理结构既可以采用顺序存储结构，也可以采用链接存储结构。

(2) 栈

栈逻辑上是一个下限为常数，上限可变化的线性表，或者是上限为常数，下限可变化的线性表。栈是一种特殊的线性表，它的插入和删除操作只能在表的一端进行。在栈中，允许插入和删除的一端称为栈顶，而不允许插入和删除的另一端称为栈底，栈的示意图见图 9.3-4。栈的操作是按后进先出的原则进行的，因此栈又称为后进先出（LIFO）表。

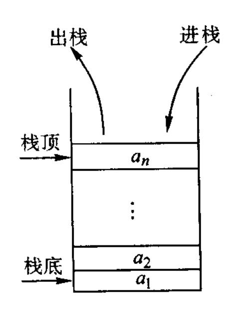


图 9.3-4　栈示意图

和线性表一样，顺序存储和链接存储结构都可以作为栈的存储结构，较常用的是采用顺序存储结构，此时要外加一个栈指示器。图 9.3-5 所示为栈的物理表示。

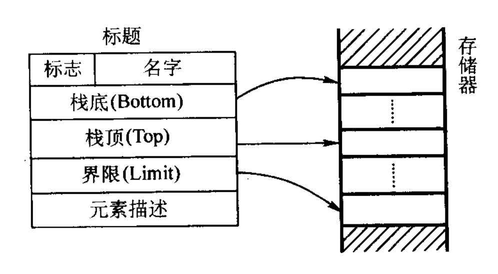


图 9.3-5　栈的物理表示

(3) 队列

队列也是一种特殊的线性表，它限定只能在表的一端插入，在表的另一端删除。允许插入的一端叫队尾，允许删除的一端叫队头。第一个进队的数据元素也将第一个出队，所以队列也叫先进先出（FIFO）表，如图 9.3-6 所示。

队列的物理存储结构可采用顺序存储结构或链接存储结构。在顺序存储结构中，要分别设头指针和尾指针，指向队头和队尾。随着数据元素的出队和进队，队头和队尾指针会不断向后移动，当队尾指针指向队列空间最大界限地址时，再有进队操作就会“溢出”。由于数据元素的出队，使得分配的队列空间中尚有空余单元，但因队尾指针已到界限，不能实现入队操作，它造成队列空间的浪费和非正常操作。如果将队列的头尾相接构成一个循环队列，就可以解决这个问题。图 9.3-7 所示为队列的物理表示。

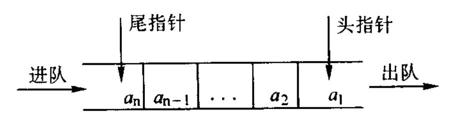


图 9.3-6　队列示意图

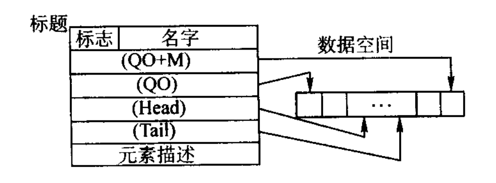


图 9.3-7　队列的物理表示

(4) 数组

数组是线性表的推广，是一组按一定顺序排列的具有相同类型的数据。一维数组的逻辑结构实际上就是一个简单的线性表。至于二维数组，可将一行（或一列）数据元素看成一个数组元素，这个数组元素本身也是一个一维数组，即也相当于一个线性表。n 维数组可以类推。

数组与线性表的存储方式相同，用顺序存储结构存放无论一维数组还是二维数组或更高维数组，在存储器中都是按一维排列存储的，只是按照一定的存储顺序。例如，二维数组有两种存储方式，其一是按行顺序存放（如 BASIC、PASCAL、C 语言等），其二是按列顺序存放（如 FORTRAN 语言）。例如 C 语言中的数组 A [3] [2] 的存储顺序为 A [0] [0]，A [0] [1]，A [1] [0]，A [1] [1]，A [2] [0]，A [2] [1]。C 语言中下标是从 0 开始，而 FORTRAN 语言中数组下标是从 1 开始的。

(5) 串

串是一种字符型的线性表，通常记作：

$$A = \text{“}a_1 a_2 a_3 \cdots a_n\text{”}$$

其中，A 为串名；用引号括起来的字符为串的值，“ ”不是串内的成分；a_i ($1 \leqslant i \leqslant n$) 是字符型常量。

串可用一个字符型数组来顺序存储，也可用链接存储。用链接存储时，先将 A 分成若干块，然后把各块依次链接起来。各高级语言中字符串的运算，利用的就是这种结构。

(6) 树和二叉树

在数据结构中，一棵树指的是一个或多个结点的有限集合 T，其中：

1) 有一个特别标识的称为该树之根的结点。

2) 除根外的其余结点分成 $n \geqslant 0$ 个不相交的集合 T_1、T_2、…、T_n，而且这些集合的每一个又都是树。树 T_1、T_2、…、T_n 称为这个根的子树。

图 9.3-8 就是一棵树，树中只有一个没有前驱的结点称为树根，其他结点仅有一个直接前驱结点；树中结点的最大层次称为树的深度；结点的子树的个数称为该结点的度；度数为 0 的结点称为树叶。图中，A 为树根；A 的度为 3；树的深度为 4；K、L、F、G、M、I、J 结点为树叶。

树的物理表示是我们关心的问题。由于多重表可用链接字给出元素之间的逻辑关系，故采用多重表能方便地表示树中各结点的分枝关系或层次关系。在树结点的表示中用链域

表示树结点之间的关系，链域的个数等于该结点的度数。例如，图 9.3-8 所示树的物理表示见图 9.3-9。

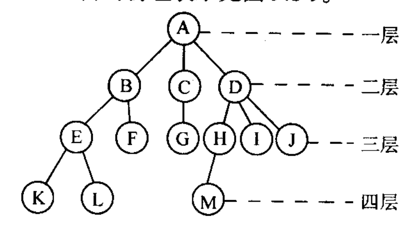


图 9.3-8　树的表示

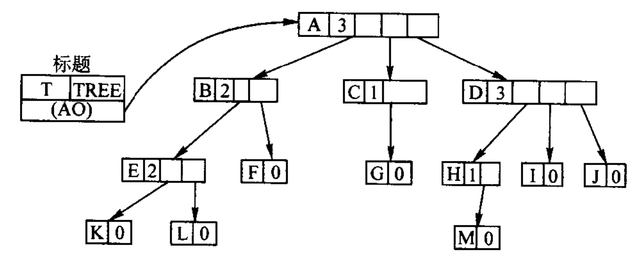


图 9.3-9　树的物理结构

这种物理表示法似乎是自然的，但在实践上却非常麻烦。因为结点链域的数量依赖于树中该结点的度数，这就给存储分配造成困难，而且对插入或删除树中一个结点记录也带来很大的不便。

我们希望能够找到一种恰当的树表示法，按此种物理表示法能通过链域动态地处理各子树，而每个结点本身按某种静态的方式来描述，也就是每个结点的结构是相同的。根据这种想法，研究一种更为基本的树结构——二叉树。

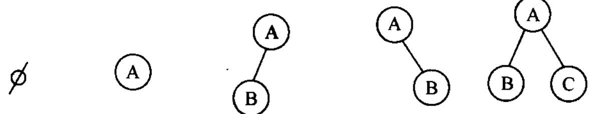
二叉树具有以下特点：

1）二叉树可以是空的，一般树则必须至少有一个根结点。

2）二叉树的度数不能超过 2，一般树则无此限制。

3）二叉树的子树有左、右之分，不能颠倒，一般树的子树则可以交换位置。

图 9.3-10 所示为二叉树的基本形式。



(a) 空二叉树　(b) 只有一个结点的二叉树　(c) 只有左子树的二叉树　(d) 只有右子树的二叉树　(e) 完全二叉树

图 9.3-10　二叉树的基本形态

二叉树的存储结构通常采用链接结构（图 9.3-11），每个结点设两个指针，左指针指向左子树的地址；右指针指向右子树的地址。这种结构与逻辑结构一致，描述清楚，也便于删除和插入运算，但占用存储单元较多。

按一定的规律，不重复地访问树中的每一个结点，称为树的遍历，对二叉树来讲，有三种常用的遍历方式。

1）前序遍历。操作过程为：若二叉树为空，则退出。否则，①访问根结点；②前序遍历左子树；③前序遍历右子树。这是一个从上至下，先左后右的原则。图 9.3-11 所示的二叉树的前序遍历为：ABDEHICFG（见图 9.3-12a）。

2）中序遍历。操作过程为：若二叉树为空，则退出。否则，①中序遍历左子树；②访问根结点；③中序遍历右子树。这是一个从左向上，先上后下的原则。如图 9.3-11 所示二叉树的中序遍历为：DBHEIAFCG（见图 9.3-12b）。

3）后序遍历。操作过程为：若二叉树为空，则退出。否则，①后序遍历左子树；②后序遍历右子树；③访问根结点。这是一个从左向右，先下后上的原则。如图 9.3-11 所示二叉树的后序遍历为：DHIEBFGCA（见图 9.3-12c）。

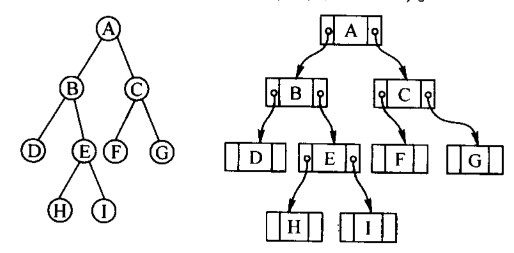
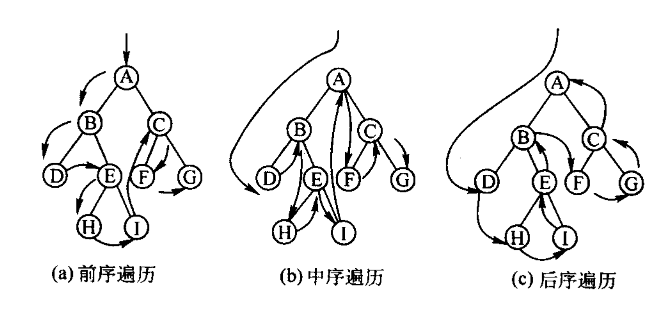


图 9.3-11　二叉树的存储结构



(a) 前序遍历　(b) 中序遍历　(c) 后序遍历

图 9.3-12　遍历示意图

（7）图

图是比树更为复杂的一种非线性结构。在图结构中，每个结点可能有多个直接前趋，也可能有多个直接后继，结点的联系是任意的，因此，它不像树结构那样有明显的层次关系，见图 9.3-13。

图是由顶点和边组成的，设图 $G=(V, E)$，其中 V 是顶点的集合；E 是边的集合。边用确定该边的两顶点表示。若两顶点是有序的，则从 V_i 到 V_j 用一带箭头的线段相连，并用尖括号表示为 $\langle V_i, V_j\rangle$，这样的图称为有向图，如图 9.3-13 中的 G3。若两顶点是无序的，则边线不带箭头，用圆括号表示为 (V_i, V_j)，这样的图称为无向图，见图 9.3-13 中的 G1，G2。

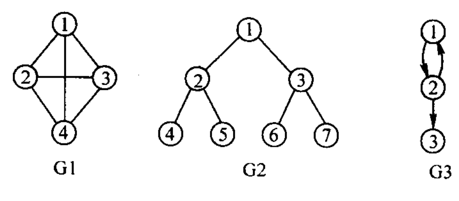


图 9.3-13　图

G2 亦符合树的定义，所以可以认为树是图的特殊情况。

通常，用 n 阶邻接方阵表示 n 个顶点的图的逻辑结构，其中每个元素满足：

$$V(i, j)=\begin{cases}1 & \text{若 } (V_i, V_j)\in E(G)\text{，即 } V_i,\ V_j \text{ 有边联结}\\ 0 & V_i,\ \ V_j \text{ 无边联结}\end{cases}$$

然后，以数组的顺序存储方式作为这个矩阵的物理结构。

在模具 CAD 系统中，设计资料（设计数据和设计结果）的数据处理要用到上述的部分内容，在模具 CAD 软件开发中要经常用到这些数据结构。

2　数表的处理方法

设计手册中有不少设计准则是以数表的形式给出的。表中为一些离散的数据点，即与一些离散点 x_i（$i=1, 2, \cdots, n$）相对应的函数值 y_i。这样的数表实际上就是列表函数。

在计算机辅助设计中对数表的处理有两种方法，一是程

序化处理，二是公式化处理。数表的程序化是指用数组或数据文件形式表示数表中数据的方法。这种方法处理的数表在本质上和设计手册中的数表没有什么区别，只是作了方便程序检索或调用的处理。

2.1　以数组的形式存放数表

这种方法是将数表存放在数组中，数据的检索直接编在程序中。下面以一维数组和二维数组存放数表为例说明这一方法。

(1) 一维数表

一维数表是最简单的一种数表，其数据可存放在一维数组中。如表 9.3-1 所示的数表为各种材料的密度，可在程序中用下面的语句将其存放在 material _ m 数组内：

```
double material _ m [4]
        ={7.87, 7.85, 8.30, 7.75};
```

这里 4 种材料的密度分别以数组元素 material _ m [i]，i =0，1，2，3 来标识。在程序中，只要给定有关材料的代码 i，即可用 material _ m [i] 表示的密度值参加运算。

表 9.3-1　材料的密度

材　料	密 度/g·cm^{-3}
工业纯铁	7.87
钢材	7.85
高速钢	8.3
不锈钢	7.75

(2) 二维数表

表 9.3-2 表示的为冲裁凹模孔口工作部分的尺寸。图 9.3-14 为几种常用的凹模工作部分型式。在程序化时，可以用一个二维数组存放这张数表。另外我们还注意到表中列出的是几种材料厚度范围内所对应的 h、α、β 值，也就是说自变量材料厚度有一定的范围。因此，在查表时应先判断材料厚度属于哪一组，然后才有可能找到 h、α、β 的值。根据上面的分析，可以编出如下查表程序。

表 9.3-2　冲裁凹模孔口工作部分尺寸（图 9.3-14）

材料厚度/mm	h/mm	α	β
≤0.5	5	15′	2°
>0.5~1.0	6	15′	2°
>1.0~2.5	7	15′	2°
>2.5~6.0	8	30′	3°
>6.0	10	30′	3°

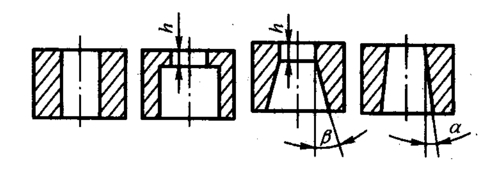


图 9.3-14　凹模工作部分型式

```
/*T—材料厚度 H—h  a—α  b—β*/
int Get _ hab (double T, double * H, double * a, double * b)
{
    double T _ array [4] = {0.5, 1.0, 2.5, 6.0};          /*材料厚度数组*/
    double Hab [3] [5] = {5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 10.0          */h 的取值*/
                          0.25, 0.25, 0.25, 0.5, 0.5,        /*α的取值*/
                          2.0, 2.0, 2.0, 3.0, 3.0};          /*β的取值*/
    int i;
    for (i=0; i≤4; i++) {
        if (T<T _ arrat [i]) break;
    }
    *H=Hab [0] [i]; *a=Hab [1] [i]; *b=Hab [2] [i];
    return true;
}
```

在设计程序中，当已知材料厚度要查找 h、α、β 的数值时，可以调用上述子程序，就可获得所需的数值。

```
double H, a, b;
Get _ hab (T, &H, &a, &b);
```

在调用函数 Get _ hab 以前，在程序中需用下列语句定义该函数：

```
int Get _ hab (double T, double * H, double * a, double * b);
```

设计手册中的大部分数表在程序中都可以用一个二维数组来代表，上面的方法是处理数表时较常使用的方法。类似地，在有些场合也可以用三维数组来存放数表。

2.2　以数据文件形式存放数表

将数表以数组形式程序化的方法，使用起来方便、快捷，但它的缺点是，数据依赖于程序而存在，若要修改数据，则要修改程序；若其他程序也需要同样数据资料，只有在各自的程序中重复处理，无法共享。因此，将数表以数组形式程序化的方法适用于一些数表较小，数值不多的情况。

在设计手册中数表很多，而且不少数表中的数据也很多。所以，在计算机辅助设计中常将数据与程序分开，单独建立数据文件，存放在外部存储器中。当程序需要用有关数据时，可以使用文件操作语句打开文件，将数据读入程序。文件可独立于应用程序存在，要修改文件中的数值不会影响应用程序，只要各应用程序了解文件的格式，都可以使用其中的数值。

这里仍以上面讲到的凹模孔口尺寸数表为例说明如何将数表存放于数据文件，以及如何调用有关数据的方法。首先，利用操作系统的文件管理功能和常用的文本编辑软件在磁盘上建立存放数表中数据的文件。例如凹模口尺寸数表的文件名为 aomo.dat，形成的文件中包括如下数据：

```
5.00  0.25  2.00
6.00  0.25  2.00
7.00  0.25  2.00
8.00  0.50  3.00
10.00  0.50  3.00
```

文件建成后，当程序中需要用到该数据时，只要打开文

件将数据读入即可。读入数据的程序段如下：

```
int i; FILE * fp;
float Hab [3] [5];
    ⋮
if ((fp = fopen ("aomo.dat","r + t")) = = NULL) {
    printf ("文件不存在");
    return false;
}
for (i = 0; i < 5; i + +) {
    fscanf (fp,"%f%f%f", & (Hab [0] [i]), & (Hab [1] [i]), & (Hab [2] [i]));
}
fclose (fp);
    ⋮
```

2.3 函数插值方法

由于许多工程问题的复杂性，难以确定变量之间的精确函数关系，所以设计手册中的许多数表实际上是人们用试验测得的数据，是经验数据的总结。用数表表示的列表函数，只能给出结点 x_i 上的函数值 y_i。如果需要求不在结点上的函数值，当精度要求较低时可用附近结点上的函数值来近似代替；如果要求较高，这就需要构造出函数关系式来近似表达列表数据关系，因而要用插值方法求得。

2.3.1 线性插值与二次插值

最简单的插值为两点插值，即用一个一次多项式 $y = p_1(x)$ 作为插值多项式，使两个插值点满足此式。其几何意义就是求通过两点 (x_1, y_1)，(x_2, y_2) 的直线。由图 9.3-15 可知，通过这两点的直线方程为

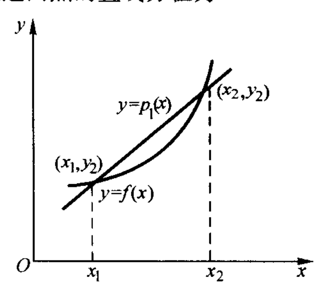


图 9.3-15 两点插值的几何意义

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) = p_1(x)$$

上式经过整理，可改写成：

$$p_1(x) = \frac{x - x_2}{x_1 - x_2}y_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}y_2 \qquad (9.3\text{-}1)$$

一次插值又称线性插值，常用来求两个数据点之间的 x 的函数值。例如，当需要求表 9.3-3 中温度为 t $(t_i < t < t_{i+1})$ 时的线膨胀系数 α 时，就可按线性插值公式求取。

$$\alpha = \frac{t - t_{i+1}}{t_i - t_{i+1}}\alpha_i + \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i}\alpha_{i+1}$$

线性插值只用到两个数据点的信息，计算简单，但求得的 $y = f(x)$ 误差较大。如果多用一些数据点来求 $y = f(x)$ 的近似值，其结果的精确程度就会改善。设已知 $y = f(x)$ 在 x_1、x_2、x_3 上的值为 y_1、y_2、y_3，这时求作一个二次多项式 $y = p_2(x)$，使 $p_2(x) = y_i$，$i = 1, 2, 3$。其几何意义是通过三点作一条曲线来近似曲线 $y = f(x)$。如果三个点不在一直线上，作出的曲线就是抛物线。

表 9.3-3 碳钢线膨胀系数

温度 t/℃	线膨胀系数 α/K^{-1}
0	1.06×10^{-5}
100	1.22×10^{-5}
200	1.28×10^{-5}
300	1.34×10^{-5}
⋮	⋮
700	1.54×10^{-5}

因为点 (x_1, y_1)、(x_2, y_2) 满足方程 $y = p_2(x)$，故可设

$$p_2(x) = p_1(x) + a(x - x_1)(x - x_2)$$

即

$$p_2(x) = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) + a(x - x_1)(x - x_2)$$

式中 a 为待定系数。由上式不难看出：$p_2(x_1) = y_1$，$p_2(x_2) = y_2$ 的条件显然满足。只要再利用条件 $p_2(x_3) = y_3$ 就可以确定系数 a。将 $x = x_3$ 代入式中，得

$$p_2(x_3) = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x_3 - x_1) + a(x_3 - x_1)(x_3 - x_2) = y_3$$

从上式中解出 a，然后代入原式，经整理可得

$$p_2(x) = \frac{(x - x_2)(x - x_3)}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)}y_1 + \frac{(x - x_1)(x - x_3)}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)}y_2 + \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_3 - x_1)(x_3 - x_2)}y_3 \qquad (9.3\text{-}2)$$

$p_2(x)$叫做二次插值多项式。这种插值称为二次插值，或抛物线插值。一般地说，二次插值的近似程度比线性插值要好些。

2.3.2 拉格朗日插值公式

将线性插值和二次插值的方法推而广之，可以求得 n 个结点的 $n-1$ 次插值多项式为

$$p_{n-1}(x) = \sum_{k=1}^{n}\frac{(x - x_1)(x - x_2)\cdots(x - x_{k-1})(x - x_{k-1})\cdots(x - x_n)}{(x_k - x_1)(x_k - x_2)\cdots(x_k - x_{k-1})(x_k - x_{k+1})\cdots(x_k - x_n)}y_k = \sum_{k=1}^{n}\left(\prod_{\substack{j=1\\j\neq k}}^{n}\frac{x - x_j}{x_k - x_j}\right)y_k \qquad (9.3\text{-}3)$$

式中，$\prod$表示累乘，$\prod\limits_{\substack{j=1\\j\neq k}}^{n}$ 表示乘积遍取 j 从 1 到 n 除 $j = k$ 以外的全部整数值。式(9.3-3)就是拉格朗日插值公式。该式在逻辑结构上表现为二重循环，内循环计算累乘，再用外循环求代数和。

2.4 交互处理方法

在设计手册中，数表的数值有时是经验值，表中给出的往往是一个取值范围。实际应用中允许根据情况综合考虑，选



取中间的某个数值。凭程序中简单的条件判断难以做出恰当的选择。此时,可以在屏幕上直观地显示整个表格,让用户凭经验自行确定并输入恰当的值。这种处理方式简便有效,利用人的经验交互处理,可以发挥人在处理这类问题中的长处。

3 线图的程序化

在设计手册中,有些设计参数之间的函数关系是用线图表示的,包括直线、折线和各种曲线图。线图的特点是鲜明直观,变化趋势明显。但是,线图本身不能直接存储在计算机中,因此在计算机辅助设计时必须将线图变换成相应的数据形式存储,供设计时检索调用。处理线图时,可先将其转换为数表,然后用前面讲过的数表程序化方法将其程序化;也可以将线图公式化,在设计程序中直接调用。

无论用何种方法处理线图,都必须首先将线图离散化。图9.3-16所示为15钢实心件正挤压时模具单位面积上挤压力与变形程度的关系图。为了把此线图变换成数表,可在曲线上取一些结点,把这些点的坐标值列成一张一维数表,如表9.3-4所示。

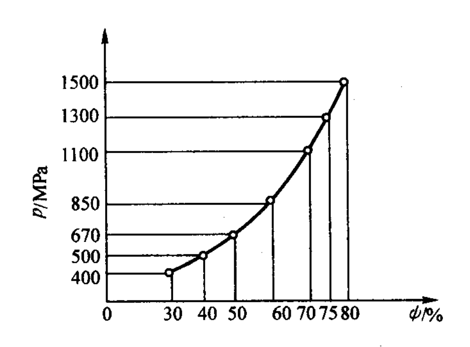


图9.3-16 15号钢实心件正挤压时单位面积上的挤压力与变形程度的关系

表9.3-4

ψ/%	30	40	50	60	70	75	80
p/MPa	400	500	670	850	1 100	1 300	1 500

结点的选取随曲线的形状而异,选取的基本原则是使各结点函数值之间相差不致很大。

由上可知,一条曲线可变换为一张一维数表。上述线图是15钢的变形程度与挤压力的关系,对于其他材料也有类似的曲线。于是,可以将各种材料的表组合成一张二维数表,经程序化处理后便可在设计程序中调用。

图9.3-17为凹模、凸模的圆角半径对黄铜极限拉延系数的关系。横坐标为凹模圆角半径和板厚之比;纵坐标为极限拉延系数。图中的四条曲线分别代表凸模圆角半径和板厚之比为1、2.5、6、10时的关系,这四条曲线可以用二维数表表示。当用数组结合这个数表时,二维数组的行可以表示 r_d/t,列可以表示 r_p/t,数组元素就是极限拉延系数 m。

除了可以将线图程序化外,还可以将其公式化,即用插值方法或最小二乘法将离散化的线图转换成公式。下面以锻模设计中使用的制坯工步选择线图为例,对线图公式化方法作一说明。

设计轴类锻模时,通常根据图9.3-18中的线图确定制坯工步。图中 x 为锻件长度与等效棒料图平均边长之比,y 为质量分布图中最大截面积与平均截面积之比的平方根。1区表示需要拔长和滚挤制坯,2区表示滚挤制坯,3区则不需要制坯工步。这里,设计准则是以线图形式给出的。用回归分析的方法可求得曲线 A、B 的方程。先将线图进行离散化处理,再采用四次多项式拟合 A、B 两曲线,得

$$A: y = 0.677\times10^{-3}x^4 - 0.024\,3x^3 + 0.323x^2 - 1.948x + 5.907$$

$$B: y = 0.131x^4 - 1.965x^3 + 7.465x^2 - 9.570x + 5.056$$

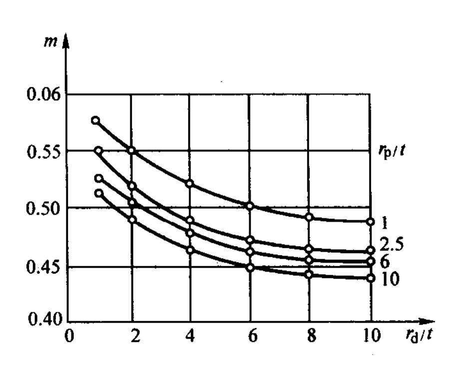


图9.3-17 黄铜的极限拉延系数与凸、凹模圆角半径的关系

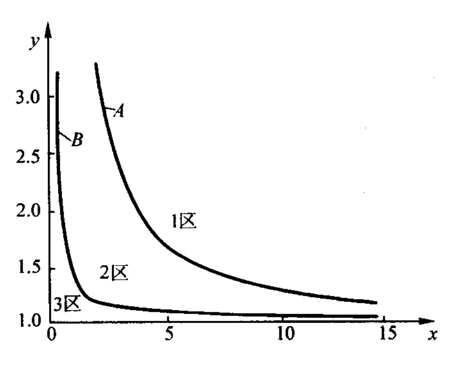


图9.3-18 确定制坯工步的线图

4 建立经验公式的方法

经程序化处理的数表,在使用时要经过查找程序进行检索调用。以离散数据点存放的数据使用不便,特别是对于某些连续变化的量,查表后往往还需进行插值。经过公式化处理的数表在程序中可直接调用,不必进行查表和插值处理。因此,在编制设计程序之前应尽可能地将数表进行公式化处理。当然,这里的前提是变量之间存在着一定的函数关系。

4.1 处理数表的回归分析方法

拉格朗日插值是将数表公式化的一种方法。但是,用拉格朗日插值建立的公式有两个缺点。第一,插值公式在几何上是用严格通过各个数据点的曲线来近似数表中变量间的关系。通过试验所得的数据点,总是具有误差的,个别数据点的误差可能还很大。另外,塑性成形过程具有不稳定和非均匀变形的特点,试验数据点可能会出现相当大的波动。显然,用插值方法进行公式化处理是不理想的。另外,严格通过所有数据点的公式是一个次数很高的多项式,设计计算时求解很困难。

鉴于塑性成形过程的特点,在对数表、线图形式的设计准则进行公式化处理,或经过试验总结经验公式时,采用数理统计的方法是恰当的。在这种方法中,成形过程被作为一个随机过程处理,要确定的变量之间的函数关系就是具有相关关系的随机变量之间的关系。

两个具有相关关系的随机变量 X 和 Y 之间,没有确定的数值对应关系。也就是说,当 X 取某一数值时,Y 并无确定的值



与之对应。这时，为了描述两随机变量之间的关系，用 Y 的条件分布的平均值(简称条件平均数)作为代表变量 Y 的数值。

对于离散型随机变量，条件平均数为

$$M(Y|X=x_i)=\sum_j y_j p\{Y=y_j|X=x_i\}$$

对于连续型随机变量，条件平均数为

$$M=(Y|X=x)=\int_{-\infty}^{+\infty} yf(y|X=x)\mathrm{d}y$$

式中，$p\{Y=y_j|X=x_i\}$为 $X=x_i$ 时 $Y=y_j$ 的条件概率；$f(y|X=x)$为 $X=x$ 时 Y 的条件概率密度。

显然，Y 的条件平均数为 x 的函数，即

$$M(Y|X=x)=\mu(x)$$

函数 $\mu(x)$叫作 Y 对 X 的回归函数，方程 $Y=\mu(x)$称为 Y 对 X 的回归方程。回归方程在几何上代表一条通过 Y 的条件平均数的曲线。这条曲线为 Y 对 X 的回归曲线。

回归函数有一个重要性质，即以平均数为中心的二阶矩 $M[Y-\mu(x)]^2$ 为最小。也就是说，若函数 $p(x)$ 使得 $M[Y-p(x)^2]$ 为最小，那么 $p(x)$ 就是 Y 对 X 的回归函数。用这种方法不难求得回归函数。该方法的几何意义是随机点 (x, y) 到回归曲线 $Y=p(x)$ 的垂直距离的平方的数学期望为最小。这就是通常用于数表、线图公式化的最小二乘法的原理。

4.2 多项式拟合

一组数据 (x_i, y_i) $i=1, 2, \cdots, n$，可以用一个 m 次多项式 $p_m(x)$ 拟合，即用 $p_m(x)$ 作为回归函数。

$$p_m(x)=a_1+a_2x+a_3x^2+\cdots+a_mx^{m-1}+a_{m+1}x^m=\sum_{j=1}^{m+1}a_jx^{j-1} \quad (9.3\text{-}4)$$

根据回归的最小性质，可以通过求解

$$\min\sum_{i=1}^{n}[p_m(x_i)-y_i]^2$$

来确定 $p_m(x)$。令 $\phi=\sum_{i=1}^{n}[p_m(x_i)-y_i]^2$，并将式(9.3-4)代入，得

$$\phi=\sum_{i=1}^{n}\left[\sum_{j=1}^{m+1}a_jx_i^{j-1}-y_i\right]^2 \quad (9.3\text{-}5)$$

式中，ϕ 可看作是 a_j $(j=1, 2, \cdots, m, m+1)$ 的函数，即可表示为

$$\phi=\phi(a_1, a_2, \cdots, a_m, a_{m+1})$$

求出 ϕ 为极小时的 $a_1, a_2, \cdots, a_m, a_{m+1}$ 的值，代入式(9.3-4)中，便可得到回归函数。这就是常用的最小二乘法。

要使 $\phi=\phi(a_1, a_2, \cdots, a_m, a_{m+1})$ 为极小 $a_1, a_2, \cdots, a_m, a_{m+1}$应满足下列方程组。

$$\frac{\partial\phi}{\partial a_k}=0,\ k=1, 2, 3, \cdots, m, m+1 \quad (9.3\text{-}6)$$

由式(9.3-5)得

$$\frac{\partial\phi}{\partial a_k}=2\left[\sum_{j=1}^{m+1}a_j\sum_{i=1}^{n}x_i^{j+k-2}-\sum_{i=1}^{n}y_ix_i^{k-1}\right] \quad (9.3\text{-}7)$$

令

$$s_l=\sum_{i=1}^{n}x_i^{l-1},\quad t_k=\sum_{i=1}^{n}y_ix_i^{k-1}$$

则式(9.3-7)化为

$$\frac{\partial\phi}{\partial a_k}=2\left[\sum_{j=1}^{m+1}a_js_{j+k-1}-t_k\right]$$

于是式(9.3-6)为

$$\sum_{j=1}^{m+1}a_js_{j+k-1}-t_k=0,\ k=1, 2, \cdots, m, m+1$$

这是一个线性方程组，解此方程组即可求得多项式 $p_m(x)$ 的各个系数 a_j $(j=1, 2, \cdots, m, m+1)$。

4.3 线性拟合与可化为线性拟合的问题

已知 n 个数据点 $(x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{im}, y_i)$，$i=1, 2, \cdots, n-1, n$。如用线性函数拟合这些数据点，即设回归函数

$$P(x_1, x_2, \cdots, x_{m-1}, x_m)=a_1x_1+a_2x_2+\cdots+a_{m-1}x_{m-1}+a_mx_m \quad (9.3\text{-}8)$$

用最小二乘法，可通过求解

$$\min\sum_{i=1}^{n}\left[y_i-\sum_{j=1}^{m}a_jx_{ij}\right]^2$$

来确定 $a_1, a_2, \cdots, a_{m-1}, a_m$。令

$$\phi=\sum_{i=1}^{n}\left[y_i-\sum_{j=1}^{m}a_jx_{ij}\right]^2$$

则由条件

$$\frac{\partial\phi}{\partial a_k}=0,\ k=1, 2, \cdots, m-1, m$$

得

$$\frac{\partial\phi}{\partial a_k}=2\left[\sum_{i=1}^{n}x_{ik}y_i-\sum_{j=1}^{m}\left(\sum_{i=1}^{n}x_{ij}x_{ik}\right)a_j\right]=0$$

令

$$c_{kj}=\sum_{i=1}^{n}x_{ij}x_{ik},\quad d_k=\sum_{i=1}^{n}x_{ik}y_i$$

则极值条件可写为

$$\sum_{j=1}^{m}c_{kj}a_j=d_k,\ k=1, 2, \cdots, m-1, m \quad (9.3\text{-}9)$$

解线性方程组(9.3-9)，便可求得回归函数。

当回归函数不是多项式或线性函数时，分析起来往往非常困难。但是对于某些问题，则可以通过转换，用线性回归的方法求得回归函数。

例如，回归函数为 $y=ae^{bx}$，两边取对数，得 $\ln y=\ln a+bx$，令 $u=\ln y$，$c=\ln a$，上式可化为 $u=c+bx$，于是可用一元线性回归方法求解。

同理，当回归函数形式为 $y=ax_1^{a1}x_2^{a2}\cdots x_n^{an}$ 时，也可用类似方法确定。

回归分析的方法不仅在处理非公式化的设计准则时非常有用，而且在通过试验建立新的算法时也极为有用。建立算法时，可先通过相关分析确定变量间的相关关系，然后用回归分析的方法确定变量间的函数关系。实践证明这种方法是行之有效的。

编写：李志刚（华中科技大学）

第4章 CAD/CAM的图形学基础

1 图形的变换

图形变换是绘图软件的基本功能。例如，放大图形使细节更加清楚；缩小图形使更多的部分成为可见；将某一图形符号旋转一定角度，移至某一位置。图形变换是计算机图形学的重要基础，也是进行CAD/CAM所应掌握的基础知识。

1.1 二维图形的变换

1.1.1 变换原理

(1) 平移变换

$x-y$ 平面上的点 P (x, y)，在其坐标方向上增加平移量 T_x 和 T_y，可变换至新位置 (x', y')。平移变换的关系式为

$$x' = x + T_x, \quad y' = y + T_y$$

平移使图形相对于原坐标系由一个位置移动至另一个位置，而图形本身不发生变化。

(2) 比例变换

若点的 x、y 坐标分别乘以 S_x 和 S_y，可得到新的点（图9.4-1）。这种变换称为比例变换，S_x 和 S_y 为两坐标方向上的比例系数。比例变换的关系式为

$$x' = xS_x, \quad y' = yS_y$$

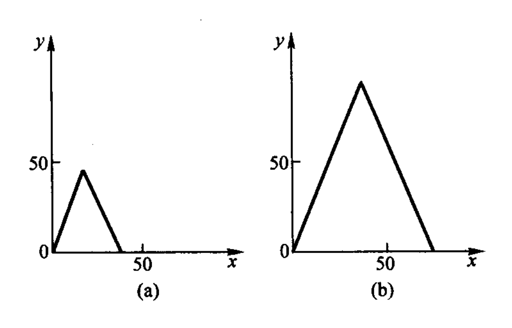


图9.4-1 图形的比例变换

比例变换有多种用途。当 $S_x = S_y$ 时，可把图形放大或缩小；当 $S_x \neq S_y$ 时，产生的效果相当于把图形沿平行于坐标轴的方向拉伸或压缩，使图形发生变形（图9.4-2）；当 S_x 或 S_y 为负值时，变换后的图形与变换前的图形对称于 x 轴或 y 轴，即可产生图形的镜像。

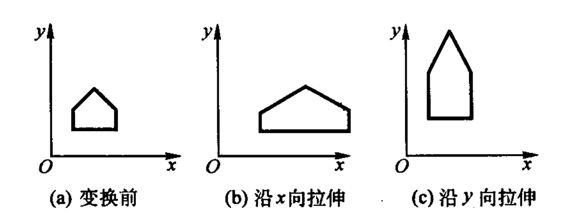


图9.4-2 利用比例变换使图形发生变形

图9.4-3为当 $S_x = -1$，$S_y = 1$ 时，产生对 y 轴的镜像。当 $S_x = S_y = -1$ 时，镜像对称于坐标系原点。通过变换产生原图形的镜像，这种变换又称反射变换。

(3) 旋转变换

图形绕坐标原点旋转某一角度生成变换后的图形，这种变换称为旋转变换。

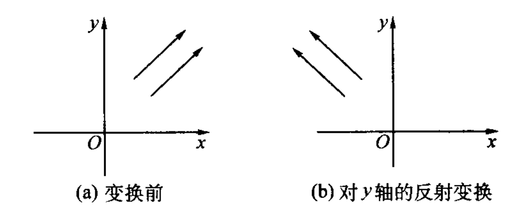


图9.4-3 利用比例变换产生对称图形

设点 P (x, y) 绕原点 O 顺时针方向旋转 θ 角后到达 P' (x', y')，则

$$x' = x\cos\theta + y\sin\theta, \quad y' = -x\sin\theta + y\cos\theta$$

图9.4-4为三角形绕坐标原点顺时针旋转45°的变换情况。三角形的三个顶点分别由原来的（20，0），（60，0），（40，100）变为（14.14，-14.14），（42.43，-42.43），（98.99，42.43）。

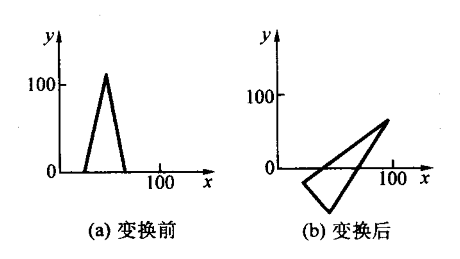


图9.4-4 图形的旋转变换

1.1.2 变换的矩阵表示

(1) 齐次坐标

对点向量〔$x\ y$〕和〔$x'\ y'$〕引入第三分量，使它们成为〔$x\ y\ 1$〕和〔$x'\ y'\ 1$〕。位置向量〔$x\ y\ 1$〕和〔$x'\ y'\ 1$〕中的第三元素1，可看作是一个附加坐标，即平面上的一个点（二维向量）用三个坐标（三维向量）来表示。这种用三维向量表示二维位置向量，或用 $n+1$ 维向量表示 n 维向量的方法称齐次坐标表示法。在齐次坐标表示法中，n 维向量的变换是在 $n+1$ 维空间内实现的。在 $n+1$ 维齐次空间中的一个向量可看作一个 n 维空间中的向量多了一个比例因子 H。通常笛卡尔坐标系中的二维点〔$x\ y$〕的齐次表达式是〔$H_x\ H_y\ H$〕，其中 $H \neq 0$。于是，给出点的齐次表达式〔$X\ Y\ H$〕，就可求得其二维笛卡尔坐标，即

$$[X\ Y\ H] \rightarrow \left[\frac{X}{H}\ \frac{Y}{H}\ \frac{H}{H}\right] = [x\ y\ 1]$$

这个过程称为正常化或规范化处理。

在齐次坐标内不存在位置向量的唯一表示法。例如齐次坐标〔15 9 3〕、〔-30 -18 -6〕和〔5 3 1〕都表示笛卡尔坐标点（5，3）。在二维变换中，为简单起见，使 $H=1$。当 $H=1$ 时，二维点（$x\ y$）的齐次坐标就是三维向量〔$x\ y\ 1$〕，其中 x，y 坐标没有变化，只是增加了 $H=1$ 的一个附加坐标。在几何意义上，相当于把发生在三维空间的变换限制在 $H=1$ 的平面内。

齐次表示法最初是作为证明投影几何定理的工具而研究出来的。在 n 维空间的问题可在（$n+1$）维空间内讨论，而在（$n+1$）维空间的结果往往比在 n 维空间易于获得。

把一个点集从一个坐标系映射为另一个坐标系内对应的一个点集，齐次坐标提供了方便而有效的方法。齐次表示法也为图形的变换提供了统一而方便的途径。

(2) 变换矩阵

如果点的位置向量用齐次坐标表示，那么平移变换矩阵、比例变换矩阵和旋转变换矩阵将取如下形式：

平移变换矩阵

$$T=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\T_x&T_y&1\end{bmatrix}$$

比例变换矩阵

$$S=\begin{bmatrix}S_x&0&0\\0&S_y&0\\0&0&1\end{bmatrix}$$

旋转变换矩阵

$$R=\begin{bmatrix}\cos\theta&-\sin\theta&0\\\sin\theta&\cos\theta&0\\0&0&1\end{bmatrix}$$

若对点〔$x\ y\ 1$〕进行平移变换，则有

$$[x\ y\ 1]\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\T_x&T_y&1\end{bmatrix}=[x+T_x\quad y+T_y\quad 1]=[x'\ y'\ 1]$$

当 $S>1$ 时，对点的位置向量进行如下变换，可使两个坐标同时缩小。

$$[x\ y\ 1]\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&S\end{bmatrix}=[x\ y\ S]\Rightarrow[\frac{x}{S}\ \frac{y}{S}\ 1]=[x'\ y'\ 1]$$

以上三种简单变换都具有可逆性，即

$$[x\quad y\quad 1]=[x'\quad y'\quad 1]T^{-1}$$
$$[x\quad y\quad 1]=[x'\quad y'\quad 1]R^{-1}$$
$$[x\quad y\quad 1]=[x'\quad y'\quad 1]S^{-1}$$

1.1.3　变换的级联

图形除了需要进行以上所讨论的一些简单变换外，通常需要进行更复杂的变换。例如绕任意点旋转，这时，我们可以通过三个简单变换来实现，即平移—旋转—平移。一系列的简单变换（变换序列）可以通过级联组合成为一个变换。

在对变换序列进行级联时，顺序问题十分重要。例如，将图 9.4-5a 所示三角形旋转 90°，然后平移 $T_x=-80$，$T_y=0$，变换后的情形如图 9.4-5b 所示。若将变换次序颠倒，则得到的图形就如图 9.4-5c 所示。

级联的主要目的是将一个变换序列表示成一个变换。设一点 P 经过 n 次变换 T_1、T_2、$T_3\cdots T_n$，则总的变换结果为

$$P'=PT_1T_2\cdots T_{n-1}T_n=PT$$

所以，总的变换矩阵

$$T=T_1T_2\cdots T_{n-1}T_n$$

例 1　求绕平面上任意点旋转的变换矩阵（图 9.4-6）。

绕平面上任意点 C（x_c，y_c）的旋转是一个组合变换。可以通过下列步骤实现：首先将坐标原点平移到旋转中心；然后进行旋转变换；最后再平移变换，恢复原坐标系。通过以上三种变换的有序级联，可求得其组合结果，即总的变换矩阵

$$T=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\-x_c&-y_c&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\theta&\sin\theta&0\\-\sin\theta&\cos\theta&0\\0&0&1\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\x_c&y_c&1\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}\cos\theta&\sin\theta&0\\-\sin\theta&\cos\theta&0\\-x_c\cos\theta+y_c\sin\theta+x_c&-x_c\sin\theta-y_c\cos\theta+y_c&1\end{bmatrix}$$

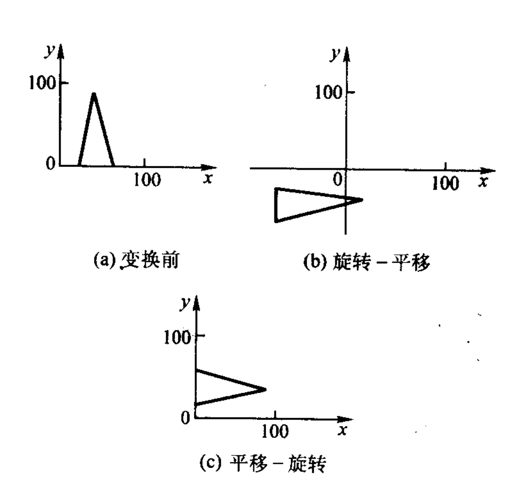


图 9.4-5　不同变换顺序产生的结果

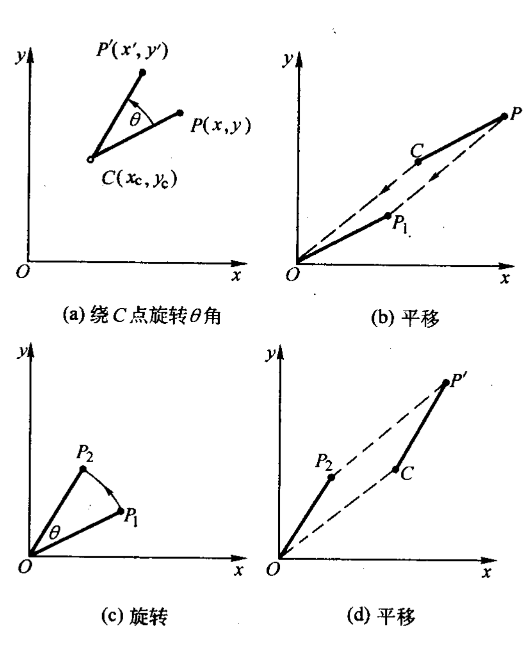


图 9.4-6　绕平面上任意点的旋转变换

1.2　三维图形的变换

前面所讨论的二维变换，扩展到三维图形变换时，三维点的位置向量齐次表示为〔$x\ y\ z\ 1$〕，齐次变换矩阵是 4×4 方阵：

$$T=\begin{bmatrix}a&b&c&p\\d&e&f&q\\h&m&n&r\\i&j&k&s\end{bmatrix}$$

因此，三维空间点的变换可写为

$$[X\ Y\ Z\ H]=[x\ y\ z\ 1]\ T$$

正常化后的坐标为

$$[X'\ Y'\ Z'\ 1]=[\frac{X}{H}\quad\frac{Y}{H}\quad\frac{Z}{H}\quad 1]$$

下面介绍一些基本的三维变换。

(1) 平移

把点（x，y，z）平移到新点（X，Y，Z）的变换为

$$[X \quad Y \quad Z \quad H] = [x \quad y \quad z \quad 1]\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & T_z & 1 \end{bmatrix}$$

其中 T_x，T_y，T_z 分别为在 x，y，z 坐标轴方向上的平移分量。

(2) 变比

用比例变换可以分别调节每个坐标方向上的大小。

$$[X \quad Y \quad Z \quad H] = [x \quad y \quad z \quad 1]\begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

对于图形总体大小的变换为

$$[X \quad Y \quad Z \quad H] = [x \quad y \quad z \quad 1]\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S \end{bmatrix} = [x \quad y \quad z \quad S]$$

正常化处理

$$[X \quad Y \quad Z \quad H] \rightarrow \left[\frac{X}{H} \quad \frac{Y}{H} \quad \frac{Z}{H} \quad \frac{H}{H}\right] = \left[\frac{x}{S} \quad \frac{y}{S} \quad \frac{z}{S} \quad 1\right]$$

若 $S>1$，则整个图形缩小；若 $S<1$，则整个图形放大。

(3) 旋转

1) 绕坐标轴旋转变换矩阵

绕 z 轴旋转 θ_z 角（图 9.4-7a），变换矩阵 $\boldsymbol{R}_z$ 为

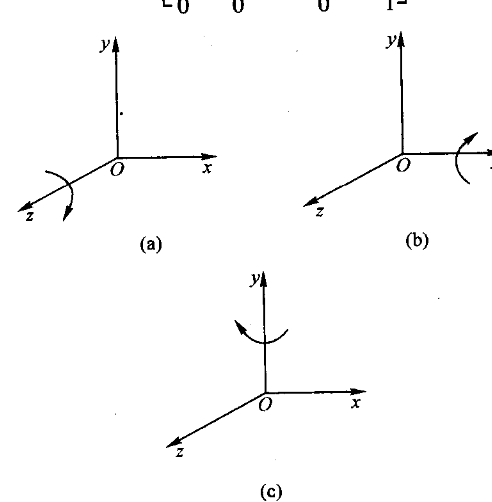
$$\boldsymbol{R}_z = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

绕 y 轴旋转 θ_y 角（图 9.4-7c），变换矩阵 $\boldsymbol{R}_y$ 为

$$\boldsymbol{R}_y = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

绕 x 轴旋转 θ_x 角（图 9.4-7b），变换矩阵 $\boldsymbol{R}_x$ 为

$$\boldsymbol{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x & 0 \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



(a)　(b)　(c)

图 9.4-7　绕三个坐标轴的旋转

2) 绕空间任意轴的旋转变换

图形绕空间任意轴（不通过坐标原点）的旋转，可以用组合变换实现。首先把坐标原点移到旋转轴上；然后绕 x 和 y 轴旋转，使旋转轴与 z 轴重合，这样图形绕任意轴旋转 θ 角就转化为绕 z 轴旋转 θ 角；最后，绕 y 和 x 轴作相反方向的旋转以及平移，恢复原坐标系（图 9.4-8）。

用在直线上的一点和该直线的方向来定义空间任意轴。这样，点的位置向量可提供平移信息，而直线的方向可提供使它旋转到与 z 轴重合的正确角度。设给定直线的参数方程为

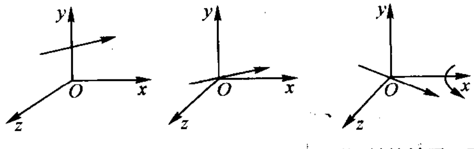
$$x = Au + x_1$$
$$y = Bu + y_1$$
$$z = Cu + z_1$$

在直线上的一点是（x_1，y_1，z_1），直线的方向由〔$A \ B \ C$〕向量定义。其变换序列如下。

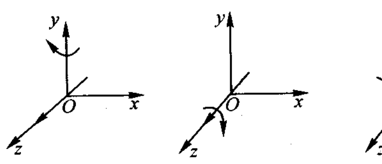
① 移动原点到旋转轴上的平移变换矩阵为

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x_1 & -y_1 & -z_1 & 1 \end{bmatrix}$$

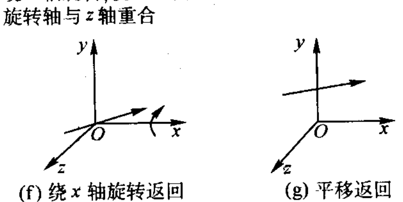
② 绕 x 轴旋转直到旋转轴位于 $x-z$ 平面内。为了确定所需要的旋转角度，把直线的方向向量置于新坐标系的原点上（图 9.4-9），研究它在 $y-z$ 平面上的投影。因平移的结果使原点（0，0，0）处于旋转轴上，所以在（0，0，0）和（A，B，C）之间的线段 L 必在旋转轴上。L 在 $y-z$ 坐标面上的投影是从（0，0，0）到（0，B，C）之间的线段 l'。



(a) 平移至原点　(b) 绕x轴旋转至xz平面



(c) 绕 y 轴旋转，使旋转轴与 z 轴重合　(d) 绕 z 轴旋转　(e) 绕y轴旋转返回



(f) 绕 x 轴旋转返回　(g) 平移返回

图 9.4-8　绕空间任意轴的旋转变换

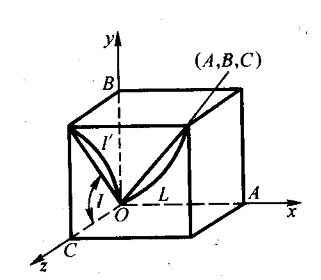


图 9.4-9　绕 x 轴转角的确定

若绕 x 轴旋转直到旋转轴在 $x-z$ 坐标面内，则 l' 将与 z 轴重合，使 l' 与 z 轴重合，需逆时针旋转 I 角。因为

$$l' = (B^2 + C^2)^{1/2}$$
$$\sin I = B/l'$$
$$\cos I = C/l'$$

因此绕 x 轴旋转变换矩阵应为

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos I & \sin I & 0 \\ 0 & -\sin I & \cos I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C/l' & B/l' & 0 \\ 0 & -B/l' & C/l' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

因为绕 x 轴旋转时，x 坐标不变；线段长度 L 不变，$L=(A^2+B^2+C^2)^{1/2}$；z 坐标为

$$(L^2 - A^2)^{1/2} = (B^2 + C^2)^{1/2} = l'$$

所以经 R_x 变换后，就可画出位于 $x-z$ 坐标面内的旋转轴（图 9.4-10）。

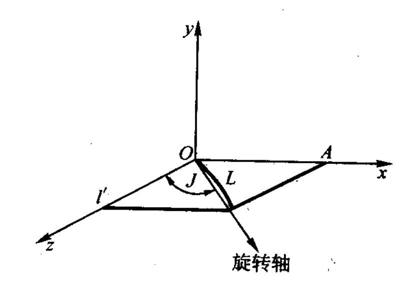


图 9.4-10　位于 $x-z$ 平面内的旋转轴

③ 绕 y 轴顺时针旋转 J 角，使旋转轴与 z 轴重合。因为

$$\sin J = A/L,$$
$$\cos J = l'/L$$

所以绕 y 轴旋转变换矩阵为

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos J & 0 & \sin J & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin J & 0 & \cos J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l'/L & 0 & A/L & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -A/L & 0 & l'/L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

④ 绕 z 轴旋转 θ 角，变换矩阵为

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

然后进行恢复原坐标系的变换。

⑤ 绕 y 轴逆时针旋转 J 角，变换矩阵为

$$R_y^{-1} = \begin{bmatrix} l'/L & 0 & -A/L & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ A/L & 0 & l'/L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

⑥ 绕 x 轴顺时针旋转 I 角，变换矩阵为

$$R_x^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C/l' & -B/l' & 0 \\ 0 & B/l' & C/l' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

⑦ 平移使坐标原点返回到它原来的位置。

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \end{bmatrix}$$

绕任意轴旋转 θ 角的变换矩阵 R_θ 是以上给出的变换矩阵之乘积，即

$$R_\theta = TR_xR_yR_zR_y^{-1}R_x^{-1}T^{-1}$$

1.3　透视变换

在计算机绘图和三维图形的显示中，透视变换是一种重要的变换，常用以产生物体的立体图。

如图 9.4-11 所示，从透视中心 $V(0,0,k)$ 将空间点 $P(x,y,z)$ 投影到 $z=0$ 的平面，得到的投影点为 $P'(x',y',z')$。投影点 P' 可以很容易地由相似三角形关系算出：

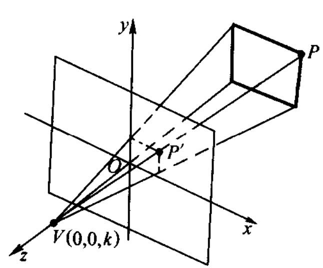


图 9.4-11　点的透视变换

$$x' = \frac{x}{1-\frac{z}{k}}$$

$$y' = \frac{y}{1-\frac{z}{k}}$$

$$z' = 0$$

因此

$$(x' \quad y' \quad z' \quad 1) = \begin{bmatrix} \dfrac{x}{1-\frac{z}{k}} & \dfrac{y}{1-\frac{z}{k}} & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

坐标 x'、y'、z' 的计算式可用齐次变换矩阵表示为

$$(xH \quad yH \quad zH \quad H) = (x \quad y \quad z \quad 1)\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1/k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

上式中，第一个矩阵表示视点在 $(0,0,k)$ 的透视变换，第二个矩阵为向 xoy 平面投影的变换矩阵。

一般地说，矩阵

$$T_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

表示透视中心在 $\left(0,0,\frac{-1}{r}\right)$ 处的透视变换。同理，矩阵

$$T_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & q \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

分别为透视中心在 $\left(-\frac{1}{p},0,0\right)$ 和 $\left(0,-\frac{1}{q},0\right)$ 的透视变换矩阵。

$(0,0,1,0)$ 表示 z 轴上的无限远点，乘以透视变换矩阵，则有

$$(0 \quad 0 \quad 1 \quad 0)\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = (0 \quad 0 \quad 1 \quad r)$$

$$\Leftrightarrow \left(0 \quad 0 \quad \frac{1}{r} \quad 1\right)$$

也就是说，z 轴上的无限远点 $(0,0,1,0)$ 透视变换后成



为有限远点$\left(0,\ 0,\ \frac{1}{r}\right)$。因此，与 z 轴平行的直线，透视变换后不再与 z 轴平行，而汇交于 z 轴上的点$\left(0,\ 0,\ \frac{1}{r}\right)$。这个点称为灭点，是视点的对称点。

交换矩阵

$$\begin{bmatrix}1&0&0&p\\0&1&0&q\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix} \text{和} \begin{bmatrix}1&0&0&p\\0&1&0&q\\0&0&1&r\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

可以产生二个灭点和三个灭点的透视。

到此为止，4×4变换矩阵在图形变换中的作用就很清楚了。在变换矩阵中，3×3子矩阵产生比例变换和旋转变换；1×3子矩阵产生平移变换；3×1子矩阵产生透视变换；S 产生整体比例变换。

为了得到物体的透视图，须选择观察点和观察方向。从观察点出发，沿观察方向将三维物体投影到视图平面上。三维物体可看成空间点的集合，产生物体透视图的过程也就是空间点的变换过程。

在这里，首先介绍透视变换中用到的三个坐标系。定义物体的坐标系为 $O-xyz$（图9.4-12），称为世界坐标系或空间坐标系。观察点的位置和观察方向都是在此坐标系中定义的。世界坐标系为右手坐标系。

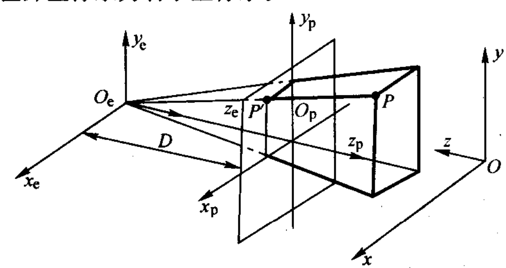


图9.4-12 透视变换中的三个坐标系

当观察者从不同位置、不同方向观察物体时，可得到不同的像。这就是在绘图区或显示屏幕上显示的图形。为此，需要建立一个目坐标系和一个视图平面坐标系。图9.4-12中的 $O_e-x_ey_ez_e$ 为目坐标系。这个坐标系的原点为观察点，其值是在世界坐标系中规定的。目坐标系的 z_e 轴为给定的观察方向。目坐标系的移动和旋转代表着观察点的移动和观察方向的改变。目坐标系为左手坐标系。

视图平面坐标系 $O_p-x_py_pz_p$ 也是左手坐标系。x_p、y_p 轴分别与 x_e、y_e 轴平行且同向；z_p 轴与 z_e 轴共线，并且同向。z_e 轴与视图平面垂直，交点为视图平面中心，亦称视心或主点。由视点到视图平面的距离 D 称为透视距离。

产生透视图要经过以下几个变换。

首先，进行观察变换，将世界坐标系中物体上的点 $(x,\ y,\ z)$ 变换为目坐标系中的点 $(x_e,\ y_e,\ z_e)$。只有完成了这一步，才能将组成物体的点透视投影到视图平面上。

观察变换可通过平移和旋转实现，即将坐标系移动和旋转，使之与目坐标系重合。为此，将世界坐标系平移，使其原点与观察点 $(x_e,\ y_e,\ z_e)$ 重合，变换矩阵

$$\boldsymbol{T}_1=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\-x_e&-y_e&-z_e&1\end{bmatrix}$$

因为世界坐标系为右手坐标系，目坐标为左手坐标系，所以须将右手坐标系变为左手坐标系。坐标系变换可用变换矩阵 $\boldsymbol{T}_2$ 实现。

$$\boldsymbol{T}_2=\begin{bmatrix}-1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

为了使两坐标系重合，还需旋转坐标系，先使坐标系绕 y_e 轴逆时针转 ϕ 角，再绕 x_e 轴逆时针转 θ 角。两次旋转的变换矩阵为 $\boldsymbol{T}_3$ 和 $\boldsymbol{T}_4$。

$$\boldsymbol{T}_3=\begin{bmatrix}\cos\phi&0&-\sin\phi&0\\0&1&0&0\\\sin\phi&0&\cos\phi&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{T}_4=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&\cos\theta&\sin\theta&0\\0&-\sin\theta&\cos\theta&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

式中 ϕ 和 θ 角可由观察方向的方向余弦直接求得。

通过上述变换，世界坐标系中物体上各点已变为目坐标中的点。此时，利用透视变换将各点投影到视图平面上，便会得到透视图。透视变换矩阵

$$\boldsymbol{T}_5=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&0&\frac{1}{D}\\0&0&0&0\end{bmatrix}$$

经过观察变换和透视变换后，可得到物体在视图平面上的透视投影。总的变换矩阵

$$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{T}_1\boldsymbol{T}_2\boldsymbol{T}_3\boldsymbol{T}_4\boldsymbol{T}_5$$

2 交互技术

应用CAD/CAM系统进行模具设计的过程是一个信息输入、处理和输出的反复过程，也是人机交互的设计过程。人机交互接口是模具CAD/CAM软件的重要组成部分。一个高效的人机通信环境可以提高设计的效率。因此，模具CAD/CAM应用软件除应具有基本功能外，一般还需要提供良好的人机界面和交互手段。软件对用户是否友好，使用和学习是否方便，已经成为衡量软件质量的一个重要方面。

2.1 交互输入技术

人机交互的过程可分解为一系列的基本操作，每种操作都是为了完成特定的交互任务，主要包括定位、定量、定向、选择、拾取和输入文本等交互任务。交互输入技术是完成交互任务的手段，它利用交互输入设备来完成操作。

(1) 定位技术

定位技术用来指定一个坐标。定位技术主要包括：

1) 用图形输入板或鼠标器控制光标定位。

2) 用键盘输入定位坐标值。

3) 用定向键控制光标定位。

(2) 定量技术

在交互过程中，常需要输入表示大小、长度、角度的一个数值。最基本的方法是从键盘直接输入数值。另外，还可以利用对话框中的滑动条输入一个值，该数值处于滑动条所定义的最小值和最大值规定的范围内。

(3) 定向技术

定向就是在一个坐标系中确定图形的一个方向。此时可通过定旋转中心，并输入旋转角来完成定向。

(4) 文本技术

文本技术主要是确定字符串的内容和长度。形成文本的技术主要有：

1) 键盘输入字符。

2）菜单选择字符。

3）单行或多行文本窗口输入字符。

4）语音识别或笔划识别等。

（5）选择技术

选择技术主要指命令或选项的选择，常用方法有：

1）用鼠标移动光标选择选项。

2）用命令和命令助记符选择。

3）通过功能热键选择。

4）语言控制选择选项。

（6）拾取技术

拾取技术指的是从屏幕上选取一个或多个图形元素，它是交互式用户接口中的重要任务之一。目前，模具 CAD 软件的开发一般都是基于一个图形软件的二次开发，拾取技术是图形软件应用程序接口的重要内容，所以在模具 CAD 软件设计时，一般不需要应用程序完成所拾取对象的判别和选取。

2.2 用户界面设计

2.2.1 交互命令的驱动方式

在 CAD/CAM 软件中，人机的交互作用过程是通过用户界面来实现的，用户界面不仅控制用户的各种输入操作，而且还控制用户程序的执行过程。在模具 CAD 软件开发中，常用的控制方式有以下几种。

（1）命令驱动方式

命令驱动方式就是用户输入命令，以驱动程序的执行。这种方式在设计中最为简单。但用户需要事先记住命令的内容和字符，这对用户来说，是一个负担。

（2）菜单（或工具栏）选择驱动方式

菜单选择驱动方式就是首先在屏幕上显示可以执行的项目，用户只需作出选择即可。这种方式用户不需记住有关的命令，只需选择所需项目即可，比较直观。

工具栏是菜单驱动方式的一种扩充，它将常用的菜单项组成工具栏，一般以图标的方式显示在屏幕上。选择时只需一次按键即可完成，方便用户的操作。工具栏是可移动和可隐藏的，用户可以根据需要调整工具栏的位置，也可以根据设计任务显示或隐藏特定的工具栏。

（3）对话框驱动方式

在模具 CAD/CAM 系统应用中，要完成一个任务，往往需要输入多个参数值，输入定位点以及拾取不同的图形实体。当没有对活框时，程序设计的特点是：提示输入要求→接受用户输入→检查输入结果→做出对应处理。这种方式无法对已经输入的参数或图形元素进行修改，而在实际的工程设计中，参数之间往往有一定的联系，有时需要根据后续参数对前面输入的信息进行调整。用对话框可以较好地解决这一问题。采用对话框，可将完成一设计任务的所有交互操作集成到一个对话框中，用户可按任意顺序进行参数输入、选择选项和拾取图形元素。采用对话框除具有更醒目、更容易理解的图形用户界面之外，还能够在简化程序的基础上，提高程序的可靠性。

构成对话框的组件称为控件，常用的控件有以下几种。

按钮（图标按钮）：在程序设计中，按下按钮都要有一个程序动作，可用于执行一段程序，或调出另一个对话框等。

编辑框：用于显示和输入字符串。有些对话框定义系统定义了输入整数、实数或文本的特定编辑框，例如 UG 系统的对话框定义模块。而有些系统编辑只是输入字符串，例如 Auto CAD 系统的 DCL，此时需要用程序进行有效性判断并将字符串转换为整数或实数，以完成整数和实数的输入。

列表框：它显示一系列字符串项目，用户可对其进行滚动显示操作，选择其中的项目。列表框中的项目可以在对话框定义时指定，也可以在程序中加入，对于从不能确定的多项目中选择一项时非常有用。

下拉式列表框：与列表框类似，但列表框是“常开型”显示，下拉式列表框仅在被拾取时才会“拉下”全部内容显示，操作后自动复原。在对话框的布局中，下拉式列表框仅占一行的位置，常用于固定不变的多项选一的选择操作。

单选按钮：它将多个按钮定义为一组，只能从中选择一个。常用于互锁的状态设置。

多选框：和单选按钮类似，也是将多个选项定义为一组，但可以作多项选择。

滑块：滑块可在设定范围内用定标设备拉动滑动键连续改变值。常用于输入在一定范围的整数或实数。

文本字符串：在对话框中，文本字符串不产生任何动作。用于显示文本字符串，作提示用。

图像区：它和文本字串一样，不产生任何动作，用于显示图形。该图形可以用图示方法表示所输入变量的意义。

在图 9.4-13 中给出了上述各种控件的样例。

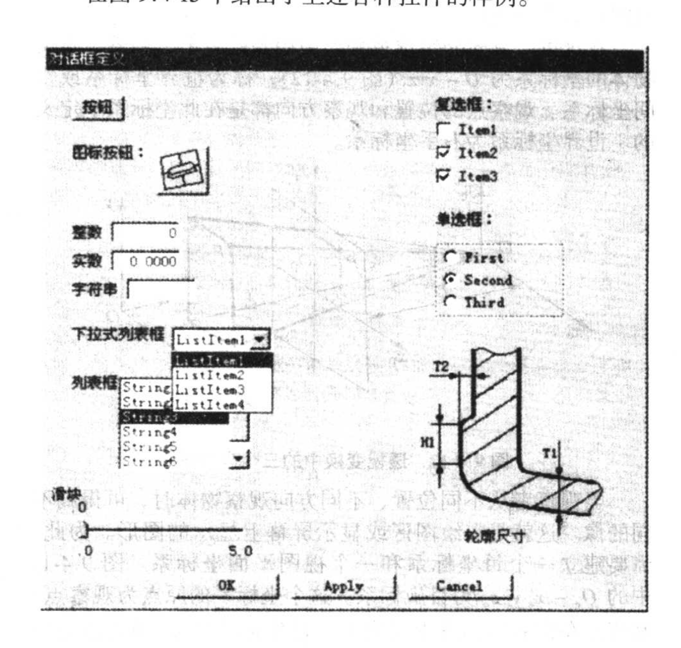


图 9.4-13 对话框的控件

2.2.2 用户界面设计

模具 CAD/CAM 系统的用户界面要结合上述命令驱动、菜单驱动和对话框驱动进行设计。一般地，对于某一特定的任务，可由命令或菜单调出相应的对话框，在对话框中设置相应的参数，最后执行并完成设计任务。一个友好的用户界面设计涉及到屏幕布局、颜色选择、字型选用等。

（1）屏幕布局

针对显示屏幕的大小和分辨率，合理、充分地利用屏幕，将屏幕作适当划分，以便适合不同的用途。模具 CAD/CAM 系统软件一般是在微机上运行，采用 Windows 操作系统，因此将模具 CAD/CAM 系统界面设计成 Windows 风格是一种较好的选择。屏幕可以分为菜单区、工具栏区、图形区、提示区和对话框区域，如图 9.4-14 所示。

（2）颜色的选择

以不同的颜色来标示信息，设置背景，分离不同形体，这对于用户在操作过程中集中注意力，减少操作错误是非常有效的，同时对操作者的情绪也会产生影响。经验表明，对颜色、灰度的选择应考虑以下几个因素。

1）尽量将颜色设计成可调，由用户自行选择设定。



2）色彩搭配要协调，避免有刺目感的颜色。

3）鲜艳的色彩可突出重点，但大面积使用效果不好，应尽量避免。

4）字符、细线和小物体应避免使用蓝色，蓝色产生收缩效果，易被人忽略。

5）避免同时使用光谱边缘上的颜色。

6）应采用总体效果偏冷的色调，有利于稳定设计人员的情绪。

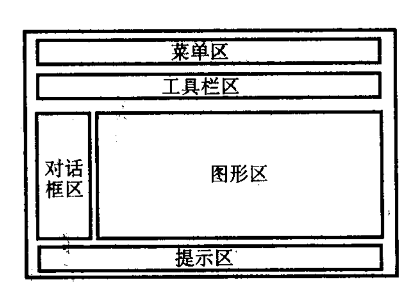


图 9.4-14 屏幕布局示意图

（3）字型的选用

无论是菜单还是系统运行中的显示信息，若字符大小和字体选用得当可以给屏幕带来生气。一般应注意以下几个方面：

1）选择不同的字体，建立起一种层次关系。如标题和文本采用不同字体，以达到清晰、醒目的效果。

2）字符间距、行间距保持一致，给人以整齐划一、有规律的感觉。

3）每行长度适当，以不多于 60 个字符为宜。

4）窗口、图形符号、光标、文本等应留有页边空白。

（4）防错和改错功能

一个好的交互式设计软件应具有防错和改错功能，并需要有完整的提示和帮助信息。防错功能要考虑以下几个方面：

1）输入错误参数。例如，当需要输入数值时输入了字符信息，或者输入了错误的参数值，程序不能正常运行，在程序中应当对参数值的有效性进行判别。

2）误操作按键。参数输入不完整时，选择了执行按键，此时程序不能正常运行，应避免死机，并提示用户进行正确的输入。有时程序执行有先后顺序关系，没有完成前面的设计或设置而选择了后面的操作，此时不能正常运行，或得到错误的执行结果，应提示用户先完成前面的设计任务。

3）选择错误的图形对象。对图形对象的操作一般会产生附加的图形信息。如果输入对象有错，结果可能不正常，或不能正常执行。此时要设置 undo 功能取消执行的命令，恢复系统到执行该命令之前的状态。

编写：李志刚（华中科技大学）



第 5 章　CAD/CAM 中的几何建模技术

几何建模是利用计算机系统描述物体的几何形状，建立产品几何模型的技术因此也称为几何造型。自 20 世纪 60 年代几何建模技术出现以来，其理论和方法得到不断丰富和发展。

模具的工作部分，例如冷冲模、注塑模和锻模的型腔，是根据产品零件的形状设计的。模具 CAD/CAM 的第一步就是输入产品零件形状信息，在计算机内建立产品零件的几何模型。

模具 CAD/CAM 涉及确定工艺方案、设计模具结构和编制 NC 程序等内容。产品零件的工艺性分析和工艺方案的确定，是以零件的几何形状和工艺特征为依据完成的。模具结构设计特别是模具工作零件的设计，有赖于产品零件的形状。在模具结构设计时，根据几何造型系统所建立的产品几何模型，可以完成凹模型腔和凸模形状的设计，产生的模具型面为模具的 NC 加工提供了基础。除了工作部分形状的设计外，模具结构零件的形状设计同样要用到几何造型技术。编制模具零件的 NC 加工程序，确定加工的走刀轨迹，也需要建立模具零件的几何模型。因此几何建模是模具 CAD/CAM 中的一个关键问题，是实现模具 CAD/CAM 的基础。

通常，几何建模系统是作为模具 CAD/CAM 系统的一个子系统使用的。几何建模子系统提供了输入、存储和编辑零件几何形状的功能，用于描述和定义零件的形状。所建立的几何模型可用于模具 CAD 和 CAM，为二者的集成创造了条件。

本章将围绕几何建模的一般概念、表示模式、造型方法及其在模具设计与制造中的应用等，阐述几何建模的有关问题。

1　几何造型的基本概念

1.1　概念

几何模型描述的是物体的几何特征，它将物体的形状及属性（如颜色、纹理等）存储在计算机内，表示为物体的三维几何模型。这个模型是对原物体的确切的数学描述或是对原物体某种状态的真实模拟，并能为各种后续应用提供信息。例如，可由模型产生有限元网格，由模型编制数控加工代码，由模型进行碰撞、干涉检查等。完整的几何模型包括两方面的内容：拓扑元素（topological element）和几何元素（geometric element）。拓扑元素表示几何模型的拓扑信息，包括点、线、面之间的连接关系、邻近关系及边界关系。几何元素则包括点、线、面的位置和度量值（长度、面积等）。

几何造型（geometric modeling）技术研究几何形体的数学描述、几何形体的计算机表示与建立、几何信息处理与几何数据管理以及几何图形显示的理论、方法和技术。通常将能够定义、描述、生成几何模型，并能交互地进行编辑的系统称为几何造型系统。几何造型通常分为线框造型、曲面造型和实体造型。

线框模型（wire frame model）是几何造型中最简单的一种模型，它由形体上的点、直线和曲线组成。线框模型具有很好的交互作图功能，用于构图的图素是点、线、圆、圆弧、样条曲线等。它还具有数据结构简单、运算速度快的特点。但是，表示的图形有时有二义性，也不能计算形体的体积、面积、重量、惯性矩等几何和物理特性，不能满足表面特性的组合和存储及多坐标数控加工刀具轨迹的生成等方面的要求。

表面模型（surface model）以物体的各个表面为单位表示其形体特征，在线框模型的基础上增加了有关面与边的拓扑信息，给出了顶点的几何信息、边与顶点、面与边之间的拓扑信息。表面模型中的几何形体表面可以由若干块面片组成，这些面片可以是平面、解析曲面（如球面、柱面、锥面等），参数曲面（样条曲面片等）。利用表面模型，可以对物体作剖面、消隐、着色、表面积计算、曲面求交、NC 刀具轨迹生成、获得 NC 加工所需要的表面信息等。表面模型虽然比线框模型包括更丰富的形体信息，但它并未指出该物体是实心还是空心，哪里是物体的内部和外部，因此，它仅适用于描述物体的外壳。曲面造型适合于设计由曲面构成的产品的外形，如飞机、汽车车身、船体和涡轮叶片等。

实体造型（Solid Model）能区分出三维形体的内部和外部，能方便地定义形状简单的几何形体（即体素）并经过适当的布尔运算产生所需的复杂形体。它与线框模型和表面模型的根本区别在于：实体模型不仅记录了全部几何信息，而且还记录了点、线、面、体的全部拓扑信息。

实体造型在机械产品的设计和制造中得到了广泛的应用，其优越性体现在以下方面：

1）设计中能随时显示零件形状，并能利用剖切来检查壁厚、孔是否相交等问题；能进行物体的物理特性计算（简称物性计算），如体积、面积、重心、惯性矩等；能检查装配中的干涉；进行运动机构的模拟等。使设计者能及时发现问题，修改设计，提高设计质量。

2）能产生二维工程图，包括零件图、装配图。

3）能进行数控自动编程及刀具轨迹的仿真。

4）可在机器人装配及柔性制造中进行装配规划、机器人视觉识别、机器人运动学及动力学的分析等。

1.2　几何造型的方法

1.2.1　形体的信息结构

形体在计算机内通常采用五层信息结构来定义，如果考虑形体的外壳，则为六层结构（图 9.5-1）。

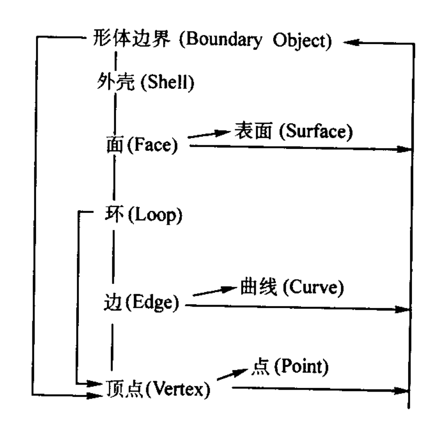


图 9.5-1　形体的信息结构

1）体。体是由封闭表面围成的有效空间。一个形体是欧氏三维空间（R_3）中非空、有界的封闭子集，其边界是有限个面的并集。

2）面。面是形体表面的一部分，具有方向性，它由一个外环和若干内环界定其有效范围，一个面可以无内环，但



必须有外环。

3) 环。环是由若干条有向边组成的面的封闭边界。环中各条边顺序相连，不能自交。

4) 边。边是形体两个相邻面的交界，一条边只能有两个相邻的面。

5) 顶点。顶点是边的端点，顶点不允许出现在边的内部，也不允许孤立地存在于面内和物体内部或外部。

6) 外壳。外壳是指在观察方向上所能看到的形体的最大外轮廓线。

7) 体素。体素是由有限个尺寸参数定义的基本形体，如长方体、圆柱体、球体等。

8) 半空间。半空间是由某一平面加上在该面上一侧的所有点定义的，可写成 $\{p: F(p) \leqslant 0\}$ 的集合，其中 p 是 R^3 中的点，F 是一平面。对于平面半空间，F 即为平面方程 $ax+by+cz+d=0$。若 F 为非平面方程，则可得到非平面半空间。显然，一个立方体可看做是六个平面半空间的交集。

9) 几何信息。几何信息是描述上述元素的几何性质和度量关系的信息。

10) 拓扑信息。拓扑信息是描述上述元素间连接关系的信息。

1.2.2 布尔运算

在实体造型中，通过布尔运算将一些基本体素组合成复杂的形体。布尔运算是一种正则化的集合运算，它保证两个基本体素经过运算后所得结果是有意义的，并可进一步参与布尔运算。

如图 9.5-2a 所示的 A、B 两形体，对于一般的集合运算，其交如图 9.5-2b，而经布尔运算，其交结果如图 9.5-2c 所示。常用的布尔运算有并、交、差、补。

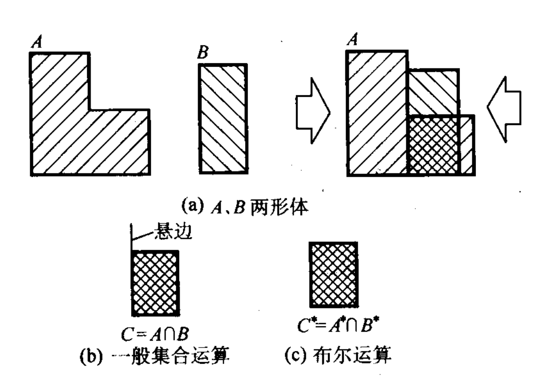


图 9.5-2　布尔运算与一般集合运算的区别

1.2.3 欧拉公式

欧拉公式常用于检验几何造型中所产生形体的合法性及一致性，以保证产生的形体有意义。对于多面体，欧拉公式为：

$$F+V-E=2+R-2H$$

其中，F、V、E 分别表示面、顶点、边的数目，R 为多面体表面不相连通的内环数，H 为通孔数。

2 形体的表示模式

在几何造型中往往采用一些抽象的几何实体去代表实际的形体。形体的表示模式就是确定采用什么形式的抽象几何实体去代表实际形体。目前，常用的形体表示模式有体素调用、空间点列、单元分解、扫描变换、构造体素（CSG）、边界表示（B-Reps）和混合模式等。其中后三种使用最为普遍，目前尤以混合模式应用最为广泛。

2.1 体素调用表示

这种表示模式采用规范化的几何形体及其形状参数描述形体，对这些规范化的几何形体作变比变换或者定义不同的参数值，即可产生不同的形体（图 9.5-3）。

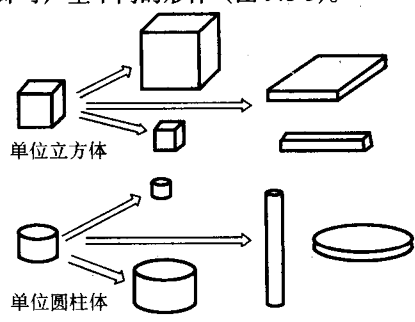


图 9.5-3　体素调用表示

这种表示模式最初用于成组技术，以便按照零件的形状和性质分类，采用相应的制造工艺。通常，由于受到初始形状的限制，体素调用不能产生比较复杂的形体，因此它很少作为独立的表示模式使用，而是在几何造型中用于定义体素。

2.2 空间点列表示

这种表示模式将形体所在空间分割成具有固定形状（如立方体）、彼此相连的一系列单元，每个单元可用其形心坐标（x，y，z）表示。通过记录形体对单元的占据状态可描述形体的几何形状。这种表示模式是坐标参数的有序集合，即空间点列。用空间点列表示形体，需要大量的存储空间，并且形体各部分之间的关系不明确。图 9.5-4 为一空间点列表示形体的例子。

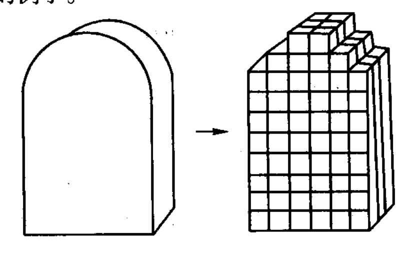


图 9.5-4　空间点列表示

2.3 单元分解表示

对一般的形体，总可以分解成一系列容易描述的形状单元（图 9.5-5）。用单元分解模式表示一形体，就是首先将形体分解为一系列单元，然后表示这些单元及其相互间的连接关系。理论上，利用这种方法可以描述任何形体，但实际上存在很多困难，并且表示不惟一。上述的空间点列表示模式可作为这种模式的一个特例。单元分解表示模式主要用于有限元的单元划分。

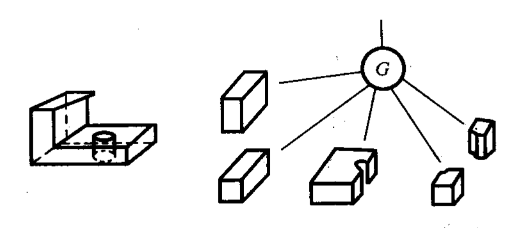


图 9.5-5　单元分解表示



2.4 扫描变换表示

扫描变换表示模式是通过一个二维图形或一个形体沿某一路径扫描、产生新形体的一种表示模式。用这种表示模式描述形体时，需要定义扫描的图形或形体（也称基体），另外还要规定基体运动的轨迹。

最常用的扫描方式有平移扫描和旋转扫描。在平移扫描中，运动轨迹为一直线；在旋转扫描中，运动轨迹为一圆或圆弧（图 9.5-6）。平移扫描适用于描述具有平移对称性的形体，即所谓 2.5*D* 形体，旋转扫描则可用于表示具有轴对称性的形体。

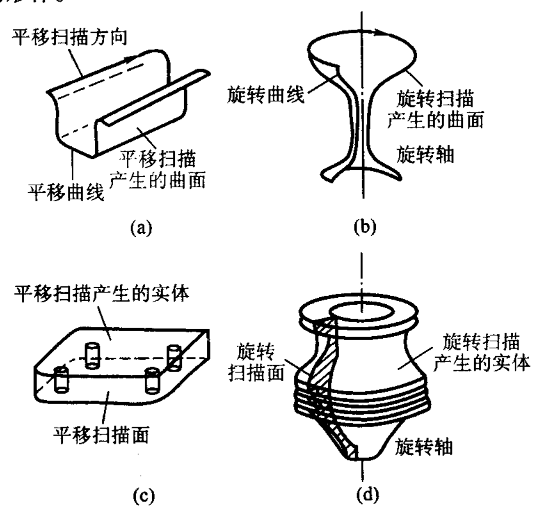


图 9.5-6 扫描变换表示的形体

2.5 构造体素表示（CSG）

这是一种利用一些简单形状的体素，经变换和布尔运算构成复杂形体的表示模式。在这种表示模式中，采用二叉树结构来描述体素构成复杂形体的关系。图 9.5-7 中，树根表示定义的形体；叶为体素或变换量（平移量、旋转量）；结点表示变换方式或布尔运算的算子。对体素施以变换，例如平移或旋转，可使之产生刚体运动，将其定位于空间中的某一位置。布尔算子可以是并、交、差等集合运算（分别用 $\cup^*$、$\cap^*$、$-*$ 表示）。

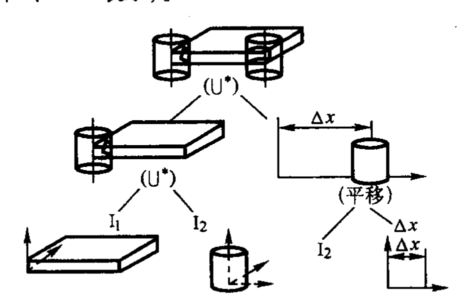


图 9.5-7 CSG 的二叉树结构

在 CSG 表示模式中，常用的体素有长方体、圆柱体、球、圆锥、圆环和楔体等，对这些体素都可用一组参数表示，如图 9.5-8 所示。

CSG 表示无二义性，但表示不是惟一的，即一个形体可能有几种 CSG 表示。这种表示模式的优点是比较紧凑，但是，当要产生图形显示时就需要计算形体的边界，计算量较大。

2.6 边界表示（B-Reps）

边界表示模式是以形体表面的细节，即以顶点、边、面等几何元素及其相互间的连接关系来表示形体的。在边界表示模式中，边界表面必须是连续的，因此物体的边界是所有面的并集（图 9.5-9）。每个面又可通过边和顶点来表示，图 9.5-10 为一四棱锥的边界表示。

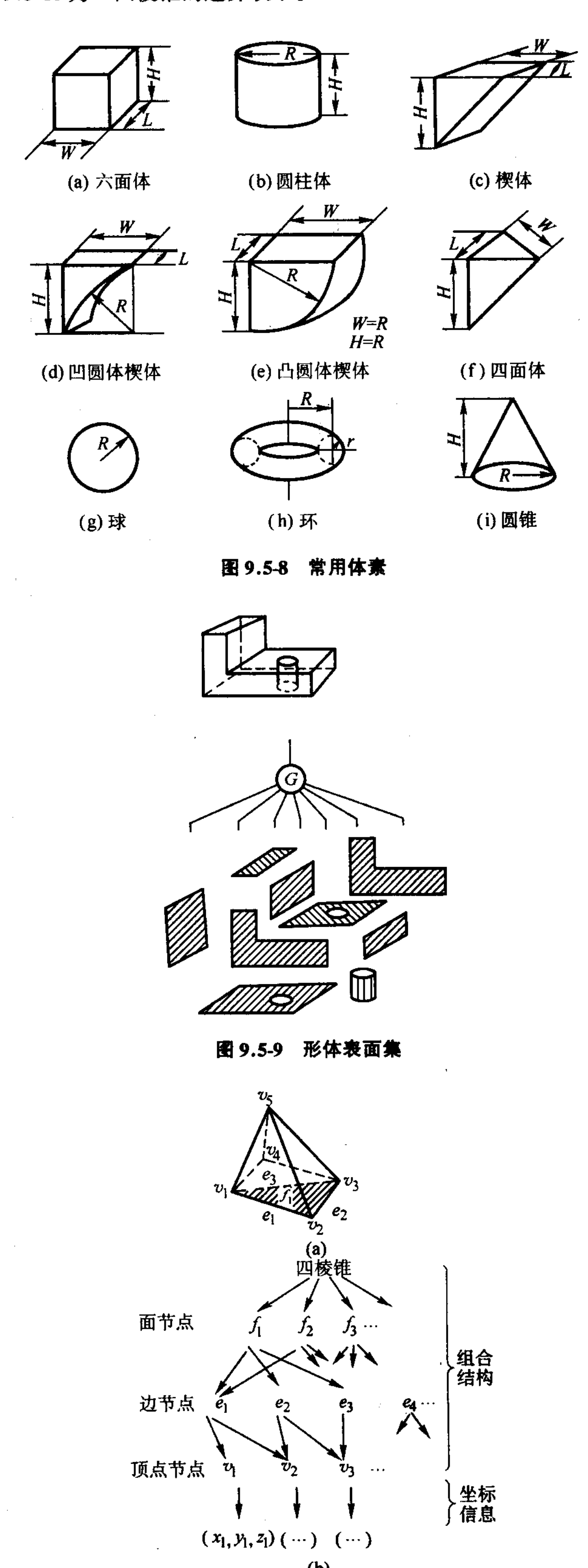


图 9.5-8 常用体素

图 9.5-9 形体表面集

图 9.5-10 一个四棱锥的边界表示



由于边界表示模式详细记录了构成形体边界的所有几何元素的几何信息和拓扑信息，从而使得图形显示、有限元网格划分、表面积计算和数控加工等功能更易实现。

2.7　混合模式

混合模式（Hybrid Model）目前还没有清楚的界定，但已经广为应用。它是在一个系统中采用不同形式的表达方法，例如常见的 CSG 法与边界表示法的混合。

混合模式由两种不同的数据结构组成，以便互相补充或应用于不同的目的。当前应用最多的混合系统都是基于这样一种设想：在原来 CSG 树的结点上再扩充一级边界数据结构（图 9.5-11)，以便达到实现快速图形显示的目的。目前，国际上比较流行的一些商用几何造型系统，大都采用 CSG/B_Reps 混合表示模式。这样可使两者取长补短，使系统的信息更加完备，操作处理更加方便。

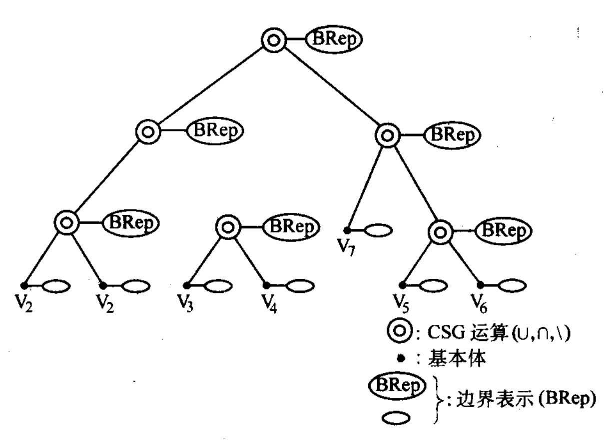


图 9.5-11　混合模式结构

3　参数化特征建模

众所周知，现实世界的物体是具有三维形状和质量的，因而三维实体造型可以更加真实地、完整地、清楚地描述物体。以几何学为基础的三维几何建模，只是较详细地描述了物体的几何信息和相互之间的拓扑关系，但这些信息缺乏明显的工程含义，从中提取和识别工程信息是相当困难的。工程技术人员在产品设计、制造过程中，不仅关心产品的结构形状、公称尺寸，而且还关心其尺寸公差、形位公差、表面粗糙度、材料性能和技术要求等一系列对实现产品功能极为重要的非几何信息，这些非几何信息也是加工该零件所需信息的有机组成部分。然而，在实体建模的数据结构中难以像对几何信息、拓扑信息一样，有效而充分地描述非几何信息。这样就会影响计算机辅助工艺规划（CAPP）和计算机辅助制造（CAM）系统直接使用 CAD 系统生成的产品信息，难以实现与 CAPP 和 CAM 的集成。

由于几何建模系统存在的局限性，近年来，人们开始研究一种新的建模方法，它面向整个产品设计过程和生产制造过程，不仅包含了与生产有关的信息，而且还能描述这些信息之间的关系，这就是特征建模。特征技术和实体造型技术的融合就是基于特征的参数化实体造型，目前大多数 CAD/CAM 软件都支持参数化特征建模。参数化特征建模的关键技术就是参数化技术和特征技术。

3.1　特征建模技术

3.1.1　特征的定义

特征概念在工程应用中的首次提出可以追溯到 1978 年。针对 CAM 的要求，人们希望找到一种从 CAD 几何模型中提取相应的零件加工几何信息的方法，从而实现加工工艺的优化设计、GT 编码和 NC 编程等。此时特征的含义是一组彼此相关的几何或拓扑实体的集合。随着特征技术研究的发展，研究者从各自不同的应用角度和目的出发给出了特征不同的定义。

从应用角度，也即制造角度，有以下定义：①特征是与基本机加工操作相对应的几何元素体。②特征是工件上一独特部分，它与特定的机加工工艺相对应。

从几何角度，特征的定义为：特征是零件表面上有意义的区域。

从设计角度，特征有以下定义：①特征是用于设计、分析和评价的信息单元。②特征是对应于设计与制造活动的某种功能形状。

目前能为大多数研究者认同的定义是：特征是具有属性，与设计、制造活动有关，并含有工程意义的基本几何实体或信息的集合。特征的这个定义强调了特征是形状和功能属性的有机组合体。首先，特征是可以表达的几何体，并且是可以供各工程应用阶段使用的对象。特征可映射成抽象的形状要素，并由一组具有特定拓扑关系的几何实体组成。其次，特征是有意义的，这种意义表现在人们从它的名称和语义就可联想到它的特定几何形状、拓扑关系、典型功能、图形表示方法、制造技术和公差要求等一系列信息。最后，特征表达了语义与一般形状要素之间的关系。

根据特征在产品定义中的不同语义特点，可将构成零件的特征进一步分为：

形状特征——产品上的一组几何实体，按照一定的尺寸和拓扑约束关系构成的特定形状要素，并具有特定的工程语义。

精度特征——产品成形后的实际形状与名义公称几何形状之间的差别或限制。

材料特征——产品在材料特性和材料处理等方面的属性信息。

装配特征——指产品定义中，零件与其他零件之间装配关系的一种信息。

实际上，无论设计还是制造，形状特征都是人们所关心的主体，而其他特征则是对形状特征或零件属性的描述。因此，可以说形状特征是产品定义的核心，是其他特征信息的载体，其他特征或信息依附于形状特征，或对形状特征进一步补充说明。所以，目前大多数 CAD/CAM 系统所指特征多为形状特征。

3.1.2　特征建模方法

目前，已经提出的特征建模方法有三种。

(1) 交互特征定义

这种方法首先建立产品的几何模型，然后由用户直接通过图形来检取定义特征所需要的几何要素，并将特征的语义等信息作为属性添加到特征模型中。这种方法具有如下特点：

1）能快速实现 CAD/CAM 系统与其他应用系统的集成；
2）可添加多种信息；
3）人工输入的信息量大，自动化程度低；
4）难以保证特征模型的一致性。

由于这些特点，这种方法出现在特征技术应用的初期。另外，在 CAD/CAM 基础上开发专业应用软件，也可以用这种方法，对系统特征定义进行扩充。

(2) 自动特征识别

在建立几何模型后，通过专门的程序，自动处理几何数据库，搜索并提取特征信息，产生特征模型。特征识别的一般步骤为：①模式匹配——标识出相应的特征；②参数确定——计算特征参数，如圆孔直径、深度等；③提取——提

取出特征实例；④规整——建立特征关系图。

用于特征识别的方法有以下几种。

1）句法模式识别法。用一系列表示为字符串码的几何元素（如直线、圆弧等）描述二维几何模式，每一个码表示一个特征的几何元素。简单的几何形状可以连在一起形成复合的几何形状。按一定的语法规则对这些元素及其序列进行编码，同时以相同的语法规则描述特定几何形状，即给出特征编码。这样，如果某段几何描述与特征描述相匹配，就识别出了这一特征。由于二维实体几何元素间序列的不惟一，所以语义模式识别法只适合于简单的二维轮廓特征的识别。

2）基于规则法。采用产生式规则描述特征，每一规则通过指定的几何元素的一系列充分必要条件，如凸凹性、正交性和邻接性等，来定义每一特定的特征类型。然后以零件几何模型为依据，通过一定的匹配机制进行特征搜索。用这种方法能识别三维特征，但并不能对每一个特征类型都写出合适的规则，而且识别过程需要反复搜索。这种方法常用于工艺计划专家系统的开发。

3）基于 CSG 模型的方法。以 CSG 实体模型为对象的特征识别方法并不多见，主要在于零件表达的不惟一性。一方面是集合关系表达的不惟一性；另一方面是同一零件可以用不同的体素生成。因此，需要处理好 CSG 树与特征生成体的一一对应关系或同一特征体的多个表达形式之间的等效性问题。从原理来看，在 CSG 表示中很多令人感兴趣的特征已经以基本体素的形式存在于几何模型中，似乎特征识别要容易些。但实际上，CSG 树表达的不惟一性使特征识别变得非常困难。

4）神经网络法。神经网络法将特征定义为拓扑或几何变量的函数，零件的几何变量值很容易从零件实体模型 B-rep 表示中获得。该方法用数码表示实体模型中的拓扑和几何关系，将零件模型表示为神经网络能够“理解”的面邻矩阵，通过特征库的每一特征类型的网络，使用特征定义语言，将面相邻矩阵输入网络中进行特征识别。神经网络法不同于其他所有方法，它避免了繁琐的逻辑搜索，而只进行简单的算术操作，所有特征还可以同时搜索。该方法可以识别出相交特征和不完全特征，是一种值得进一步研究的特征识别方法。

5）体积分解识别法。这是将零件毛坯上切去的材料体积分解成与不同加工操作相应的加工单元来识别零件加工特征的方法。加工操作切去的体积表达为毛坯与最终零件的布尔差形式。用体积分解法进行形状特征识别，可获得一种关于产品的中性特征描述，通过特征映射，可以从中性特征描述中获得各种面向具体应用的特征描述。

上述特征识别方法在应用上都存在着一些缺陷，所能识别的特征类型有限。例如，特征识别算法依赖几何模型的表示方法；算法依赖应用特征规则的定义；识别过程非常复杂，对复杂特征的识别容易出错；不能派生出零件模型中不存在的信息。为满足并行设计自动化系统的开发需求，还需要研究以下问题。

① 特征识别系统与各种 CAD 系统的接口。大多数特征识别系统都是针对特定 CAD 系统内部几何模型的，对于不同的 CAD 系统不一定都有效。然而，作为 CAD 系统与应用系统的重要连接，特征识别应该能够与任何 CAD 系统集成。为实现这一目的，开发一种算法将各种几何的表示模式转换成一种统一的数据表达模式作为特征识别的预处理，是一种可能的方案。随着数据交换标准 STEP 的进一步完善和推广，这一方法变得更为可行。

② 零件属性的识别与抽取。特征识别系统不仅应能自动识别一个零件的几何和拓扑属性，即形状特征，而且也应能识别和抽取其他相关的非几何属性，如公差、表面粗糙度等。这些信息对 CAPP 和 CAM 是至关重要的。目前大多数特征识别系统都只能识别零件的形状特征，而非几何信息仍然要通过人机交互输入。这不利于 CAD/CAPP/CAM 的完全集成，所以需要开发能够自动识别与抽取形状特征及其相关属性的特征识别系统。

③ 基于自学习的特征识别系统。目前的特征识别系统都只能识别系统预定义的特征类型，对新出现的特征类型就无能为力了。因此，开发能自学习的特征识别系统就显得十分重要。用户给系统显示一些新的特征实例，如通过选择一组面，将它们定义为某一特征，并指出其中的一些特征面。通过几个例子后，系统首先对它们进行抽象，找出这些例子的共同点，然后自动识别出零件中这类特征的其他实例。神经网络和语义网络技术可用于这类系统的开发。

特征识别的主要任务是自动检测零件上具有的特定形状特征，这些形状特征的意义对设计人员来说是非常清楚的，只是在几何造型中，用低层的几何信息和拓扑信息来描述零件时被丢失了。因此，更合理的特征建模方法，是设计人员直接用特征来建立产品特征模型，并存储这些信息，而不是事后进行识别，这就是基于特征设计的出发点。

（3）基于特征的设计

预先将一些标准的特征或用户自定义的特征存储在特征库中，设计时以特征库中的特征为基本造型单元，通过特征的增加、删除和修改等操作建立产品的特征模型。

由于生产规模、加工环境、产品标准化、系列化及相似性程度的差异，针对各种不同的情况，基于特征的设计方法大致分为三种。

1）“面向制造”的设计。它同时进行产品设计和加工工艺方案设计，在设计阶段就可以充分考虑加工的要求。在这种设计方式中，设计师以“加工方式工作”，实施各种操作将原始形状转化为具有理想特征的零件和产品，然后由工艺师来完善工艺方案。这种方法的特点是采用加工方式进行设计，设计过程中所采用的体素就是加工工艺结构要素。

2）“面向装配”的设计。它采用公差分析方法，根据“成本－公差”曲线来优化装配公差，以装配为目标来指导零件设计，获得最佳装配效果。它以成组技术（GT）编码为线索，依据零件的几何和工艺相似性来指导设计和生产，从而达到减少零件个数、机床种类、刀具和夹具种类的目的。在工艺路线确定后，还可以针对粗、精加工的特点拟定加工参数的优化目标。这种方法的特点是在设计阶段就初步确定了各加工面（或特征面）的加工方法，通过“成本－公差”关系来优化加工方式的组合，依据 GT 码来组织零件的设计和生产。

3）参数化设计。对于标准化系列化的产品，各个零件族的变化都可以用一组参数控制，因此各零件族的几何特征及加工过程都可以用参数来表达。因此，这种方法具有较高的生产效率。

当已知某一特征的几何属性和工艺知识时，可以按照以下步骤设计这一特征：

① 选定一组控制几何形状和属性值的基本参数变量。

② 根据选定的几何控制参数，推导出其他形状参数的约束方程及计算方法，确定参数实体的拓扑结构的构造方法。

③ 定义一组几何控制参数的合法校验规则和拓扑校验规则，分别用于检验输入参数和布尔运算的结果。

④ 定义特征所具有的属性类型（如形状公差、位置公差和粗糙度等）、属性记录的初始化方法、父子特征间属性的继承关系及引用关系和属性值的校验规则。

⑤ 定义各个部分的成形方法和装配关系等。

⑥ 定义特征信息的交换方式。



特征设计反映了设计与制造的特点。由于特征定义形式的差异较大，种类繁多，因此在特征设计之前必须作 GT 分析，建立标准化的特征库，以实现设计过程和工艺流程的标准化。特征库的建立以特征定义和特征分类为基础。

为了描述形状复杂的零件，必须对其主特征构成元素，即主特征进行分类。根据构造零件形状、满足零件的不同功能，将形状特征分为主特征和辅助特征。主特征构成了零件的主体结构，辅助特征依附于主特征而存在，是在主特征的基础上对零件的进一步描述。

基于特征设计的方法力求一开始就将特征融合到产品模型中，并试图提供更丰富的产品信息，与后续过程实现信息共享和集成，便于表达设计意图。因此，一般都允许用户根据使用领域和习惯建立"用户特征库 UDFL（User Define Feature Library)"，而产品设计过程就是库中特征实例化的过程。

特征库是具有相同结构特征的元素组合到一起所形成的集合，以后在设计类似这种结构特征的零件时，便可以从特征库中调用某一特征，输入特征的尺寸，在屏幕上便可自动显示此特征的图形。

3.1.3 特征的表达模式

零件的几何形状（几何信息）及除此之外的其他信息（非几何信息）是特征表达内容的两个方面。根据几何信息与非几何信息在数据结构中的关系，特征表达可分为集成表达与分离表达两种模式。集成模式的优点在于：①可以避免内部几何模型数据与外部非几何数据描述对象的不一不致及冗余；②可以快速而方便地对各抽象层次的数据进行存取和通讯；③可以同时对几何模型与非几何信息进行各种操作。特征的分离表达模式也有不少人采用，这是因为：①集成模式的采用需要从头开始设计和实施全新表达方案，困难很大，不易立即见效；②现有的实体表达模型不能很好地满足特征模型表达的需求；③可利用现有成熟的商用实体造型系统进行二次开发。

无论采用何种模式，有效地将几何信息与非几何信息关联起来是特征表达技术中的关键问题。特征的几何信息可以在不同抽象层次上表达，因而出现了显式表达、隐式表达、中性语言表达以及面向对象等表达方式。特征的几何信息可以用生成该特征的过程来表示，也可以用几何模型表示，前者称为隐式或过程表达，后者称为显式或枚举表达。中性语言描述不必包括任何关于该特征如何变为几何模型的描述，是更为抽象化的特征表达方法。

显式表达常采用 CSG 和 B-Reps 数据结构。在特征表达中也用到以下数据结构：①混合式 CSG/B-Rep 结构，它克服了单纯 CSG 及 B-Rep 的一些缺点，同时保留了 CSG 及 B-Rep 的优点。②增强图，其图域是由边分类和几何关系构成，多用于特征识别。③代数描述，主要用于 2 维特征的表达。④约束型 B-Rep 结构，在这种模式中，特征尺寸、形状、方向和位置等几何约束用基于面的二叉树表达。树的内结点是布尔操作或几何变换，叶结点是面或集。

近年来，面向对象的建模技术也用于特征表达。有关特征的知识被封装于称之为对象的信息单元中。操作对象的知识可以是参数、产生式规则、过程与函数等。

下面给出一个冲压零件的特征表达方法。

与一般的机加工零件不同，冲压零件是由平板毛坯经冲压加工而成的空间复杂形状的零件。其厚度方向上的尺寸一般远小于另外两个方向上的尺寸。冲压件的描述可以采用实体表达（图 9.5-12a）和面表达（图 9.5-12b)。

实体表达采用三维实体模型表示零件。由于绝大多数冲压件的上下表面是等距面，因此冲压件可由上下表面中的任一表面惟一确定。这种面表达方法所需的数据量明显减少。特别是对冲压件来说，其表面是复杂的空间曲面，一般数据量很大，采用面表达既可清楚地描述零件形状，又可大大节省计算机资源。

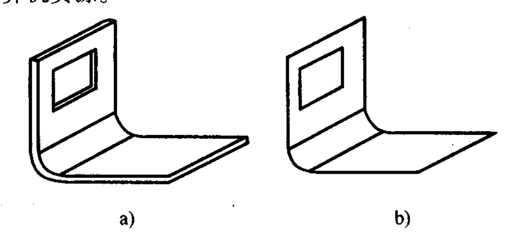


图 9.5-12 冲压件的表达方式

基于特征的冲压零件产品模型包含了多种抽象层次的特征几何实体，从一维几何特征点到三维特征曲面。图 9.5-13 所示为冲压零件的特征表达模式。

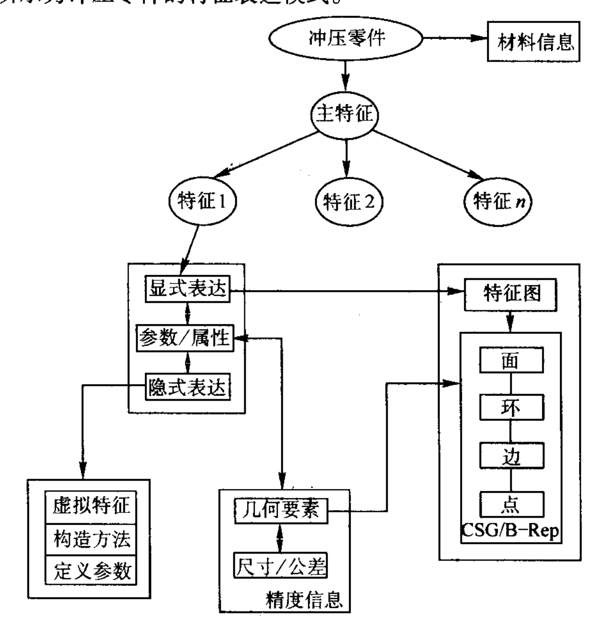


图 9.5-13 冲压零件的特征表达模式

在基于特征的冲压件表达中，形状特征的表达是特征模型表达的主体，精度信息作为形状特征的参数或属性，附属于相应的形状特征。材料信息作为零件的总体信息的一部分内容表达。

采用隐式和显式表达相结合的方法表达冲压件的形状特征。所谓隐式表达是用能惟一确定物体形状的特征参数或特征几何来表示特征的方法，特征的边界信息需要通过计算才能确定。而显式表达则是显式地描述物体边界几何信息的表达方法。

隐式表达模式通过参数集来描述特征，这些参数反映了产品定义的上层数据，一般为特征的宏观属性。但是，在设计时常常有一些特征无法用参数表示。另外，隐式表达不能定义公差、表面粗糙度等依赖于显式特征的信息。因此，采用显式与隐式相结合的混合表达模式可有效地表达特征信息。

3.1.4 特征的映射

虽然特征识别或特征造型解决了基于特征的信息建模问题，但特征是零件或产品上一个与具体应用相关的特定部分。不同的产品类型有其各自不同的结构特征，不同的应用观点需要用不同的特征集来描述其感兴趣的信息。因此实现产品生命周期各应用阶段的信息交换与共享，就必须提供产品特征的可扩展机制及不同特征集之间的交换机制，这就是特征映射。



特征映射（又称特征变换）是从同一产品的一种应用特征向另一种应用特征的转换过程。

（1）特征映射的基本形式

1）一对一映射，又称为一致性映射。诸如孔、槽等简单形式的特征，映射前后的特征形状一一对应，基本没有改变。

2）变异式重新参数化映射。在应用域中特征参数通过映射重新确定。

3）针对性映射。适用于两特征集应用域不同的情况，例如通孔这一设计特征，根据其直径和长度的变化，可以映射成几种制造特征（即可能有不同的加工方法）。这是一对多的映射。

4）投影映射。与针对性映射相反，它将几个语义不同的特征，通过忽略不同的属性信息，映射成同一个更加抽象的特征。

5）聚合映射。将多个特征组合为单一特征。

6）分解映射。单一特征经过映射分解成多个特征。

7）共轭映射。体特征被分解为面特征，面特征再重组为体特征。这是一种较为复杂的特征映射。

上述特征映射方法分类有助于从理论上分析、认识特征映射的本质与机理，并在一定程度上简化了特征映射过程。

（2）特征映射的基本方法

1）特征交互代数法。其基本思想是利用一个集合元素进行组合的规则来确定被加工零件所有可能的制造特征集。对某一零件的一组特征，按该方法可得出同一零件的另一组特征集。如图 9.5-14 所示的通孔特征，它有不同的特征实例，这样在零件工艺规划设计中，可以生成不同工艺方案供优化选择。

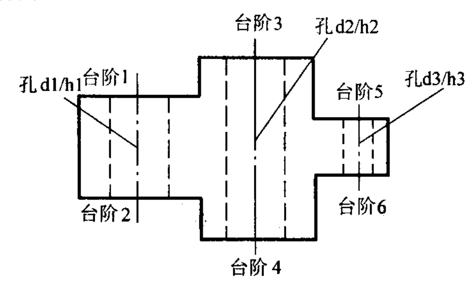


图 9.5-14 通孔特征的不同实例

2）特征提炼几何推理法。它在基于规则的知识库支持下处理设计特征向制造特征的转换问题。通过特征分类、特征关系标识等步骤，将设计特征提炼成零件毛坯和对应加工时的中间制造特征。设计师可在基于设计特征的特征造型系统上，从毛坯上减去或增加特征。其特征操作顺序就构成了设计特征链。

3）特征表示与转换的图语法。该方法是基于“设计是一个约束满足的过程”而提出的。特征建模是组织和管理设计约束的抽象过程。图语法可表示为操作特征与几何约束，几何约束用于特征的符号定义，并定义特征的位置和方向。图语法分析与基于知识的技术相结合用于特征信息推理和传播的几何约束，该方法中的图表示设计的几何约束，图中结点表示构成零件的几何元素，结点间的联系表示结点间的关系、距离、角度等约束。图语法就是对图结构进行操作的一组规则，图语法分析就是根据指定的规则重写图结构的过程，包括递归搜索和替换图结构等。所以，可用指定的图语法对给定设计的图结构进行分析，抽取特征信息，而用不同的特征图语法规则就可以推理出不同的特征集，从而实现特征映射。

4）形状特征对象图生成法。这种方法采用形状特征对象图 SFOG（Shape Feature Object Graph）作为几何模型的基本描述。图的结点对应形状特征元素，用 D 或 P 表示其类型，D 表示外特征或凸出的加特征，P 表示内特征或凹进的减特征。弧线表示元素间的父子依附关系，特别是它们之间的面关系。这种面关系分成父元素的联结面和子元素的虚面两类。在模型中，联结面表达存在于特征上的实际面，而虚面表达增加于特征上的闭合面。SFOG 图虽然是面向特征的，但与具体应用无关，并以适合于特征映射的方式记录了面向各种应用的共同知识。设计一个特征转换器是根据用户定义的特征库，通过图匹配的特征识别技术从 SFOG 图生成面向各种应用的特征模型。

从信息集成和并行设计的角度来看，由一种特征集向另一种特征集的单向映射是不理想的，因为特征映射是按顺序处理方式进行，应用程序必须在映射过程结束后才开始执行。例如，当工艺人员在执行工艺计划的应用程序时，发现某一特征无法加工，需要修改特征参数，但此时的他并不能自行修改特征参数以及将修改内容传播到其他特征集，而必须返回到设计阶段，对设计特征参数进行修改，再重新通过特征映射才能实现。如果不具备将某一特征的修改内容传播到其他特征集的条件，就会出现设计特征参数与制造特征参数不一致的情况。此时就很难进行正确的参数修改。

特征映射应该是任意特征集之间在相应的知识库支持下自由进行的双向转换，某个特征集内所作的修改应该可以通过映射机制自动地传播到其他特征集而引起相应的修改，自动地维护数据的一致性。

任意特征集 X 和 Y 之间的双向转换有四种可能的转换方式。

① 直接映射。特征集 X 中的一个特征映射为特征集 Y 中的一个重迭的特征，如设计特征槽到制造特征槽的映射。

② 投影映射。特征集 X 中的一个特征略去某些信息后被映射为特征集 Y 中的一个特征，后者是前者的一个子集。如圆角到尖角的映射。

③ 等效映射。特征集 X 中的一个特征被映射为特征集 Y 中的一个特征，它们只具有逻辑上的联系。如设计特征的筋片在有限元分析时映射为载荷。

④ 共轭映射。特征集 X 中的一个或一组特征通过重新组织特征实体而被映射为特征集 Y 中的另一个或另一组特征，后者可由前者通过几何推理得到。如设计特征的加强筋到工艺特征的槽的映射。

3.2 参数化技术

采用传统的实体造型方法，设计人员必须知道产品的精确形状，造型时用这些固定的尺寸值定义几何元素，得到产品的几何模型。要想修改结构形状，只有重新造型。而新产品的设计不可避免地要多次反复修改，进行零件形状和尺寸的综合协调、优化。对于定型的产品设计，需要形成系列，以便针对用户的生产特点和应用需求提供不同型号规格的产品。这就是参数化设计技术产生的背景。参数化设计用约束来表达产品模型的形状特征，定义一组参数以控制设计结果，从而能够通过调整参数来修改设计模型，并能方便地创建一系列在形状或功能上相似的设计方案。采用参数化造型技术，产品模型的修改通过尺寸驱动和参数驱动实现，给定几组参数值便可以实现系列零件或部件的自动生成。参数化设计技术为初始设计、产品模型的修改、系列零件族的生成和多方案的比较等提供了强有力的手段。

参数化的本质是施加约束和约束满足，在应用参数化技术中，如何对几何图形施加正确约束是建立参数化几何模型要解决的关键问题。下面将介绍参数化约束建模的基本概

念。

3.2.1 约束的分类

对于一般的参数化设计系统，其中的约束分为几何约束和工程约束。几何约束是指几何元素之间的约束关系，而工程约束则反映了产品在工程语义上的设计要求，一般以几何设计参数为变元的约束方程的形式提供。工程约束的引入使得设计者可以直接关注设计的功能要求，从而为概念设计提供了有力支持。工程约束一般与特定的应用有关，这里讨论的约束主要指几何约束。

几何约束包含两种类型：结构约束和尺寸约束。结构约束是指几何元素之间的拓扑结构关系，描述了几何元素的空间相对位置和连接方式，其属性在参数化设计过程中保持不变。它在参数化草图的生成过程中，往往是隐含的，可以不明确给定，也可以交互设定，如平行、垂直、相切等。尺寸约束是通过图上的尺寸标注表示的约束，例如距离、角度等。工程图中的尺寸是几何元素关系的自然描述，从而提供了修改几何形体的合适方式。

(1) 尺寸约束

按尺寸标注方式的不同，尺寸约束分为以下几种。

1) 对齐尺寸。它反映了线段的长度，如图 9.5-15a 所示。

2) 垂直尺寸。它反映了线段的垂直高度尺寸，如图 9.5-15b 所示。

3) 水平尺寸。它反映了线段的水平长度尺寸，如图 9.5-15c 所示。

4) 角度尺寸。它反映了两线段之间的夹角尺寸，如图 9.5-15d 所示。

5) 直径和半径尺寸。它反映了圆或圆弧的直径或半径值，如图 9.5-15e 所示。

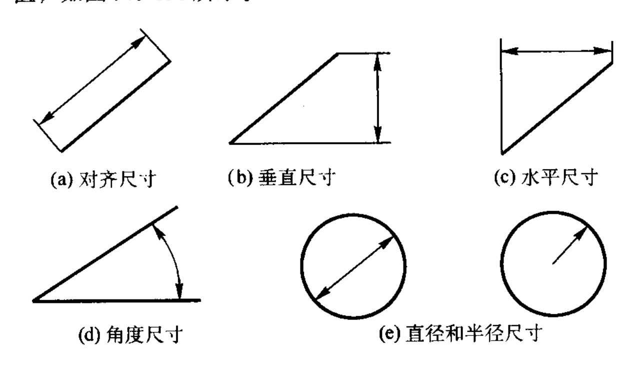


图 9.5-15 尺寸约束

上述尺寸约束是尺寸标注形式，在参数化设计系统中，尺寸约束最终仍表示为几何元素的约束关系，也就是元素之间的距离、角度等。图 9.5-15 的前三种情况实际上反映的几何元素之间的距离关系。根据约束的几何元素的不同，距离尺寸可以分为以下几种。

1) 点与点之间的距离，见图 9.5-16a。
2) 点到线的距离，见图 9.5-16b。
3) 平行线之间的距离，见图 9.5-16c。
4) 点到圆之间的距离，见图 9.5-16d。
5) 线和圆之间的距离，见图 9.5-16e。
6) 圆和圆之间的距离，见图 9.5-16f。

(2) 结构约束

在参数化设计系统中，常见的结构约束有以下几种。

1) 平行约束。表示两线段平行。
2) 垂直约束。表示两线段垂直。
3) 水平约束。线段平行于 X 轴。
4) 铅垂约束。线段平行于 Y 轴。
5) 相切约束。它包括线和圆相切，以及圆和圆相切，两圆相切又可分为内切和外切。
6) 共线约束。不直接相连的两条线处于同一条直线的延长线上。
7) 点在线上约束。一个点在直线上。
8) 点在圆上约束。一个点在圆上。
9) 同心约束。两个或多个圆和圆弧的圆心处于同一点上。
10) 等半径约束。两个或多个圆和圆弧的半径相等。

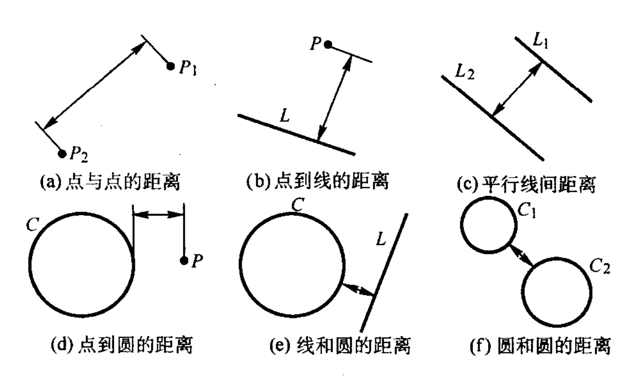


图 9.5-16 用几何元素表示的尺寸约束

3.2.2 几何实体的自由度

自由度是指控制几何实体形状和位置的独立变量的个数。对于二维平面上的点，其几何信息由两个独立的坐标变量表示 $P(x, y)$，所以点的自由度为 2。直线的方程可以写为 $y = kx + b$，有两个独立变量（k 和 b），其自由度为 2。平面上的圆的方程为 $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$ 包含 3 个变量，其自由度为 3。对于二维平面上的刚体，它具有两个平移自由度和一个转动自由度，故平面刚体的自由度为 3。对于三维空间中的刚体，自由度为 6。

3.2.3 约束的约束度

由某个约束引起的相关几何实体自由度的减少量称为该约束的约束度。约束实质上表现为一组约束方程，约束的引入会限制几何实体的运动，从而导致了相关几何实体的自由度的减少。几何约束的约束度一般为 1，少数约束的约束度为 2，如共线约束和两平行线间的距离约束，约束度为 2。

在参数化设计中，如果零件几何实体的几何形状和拓扑结构关系不变，则可以认为它是一个刚体，也就是此时施加约束后的几何模型的总体自由度等于刚体的自由度。根据零件模型的几何实体的总体自由度和约束度的关系，约束模型可分为下面几种情况。

1) 过约束（over-constrained）。一个几何约束系统在结构上的约束过载，也就是总体约束度大于其几何实体的总体自由度加上刚体自由度。

2) 欠约束（under-constrained）。一个几何约束系统在结构上的约束不足，即总体约束度小于其几何实体的总体自由度加上刚体自由度。

3) 完备约束（well-constrained）。一个几何约束系统在结构上的完备约束指的是约束模型总体约束度等于几何实体的总体自由度加上刚体自由度。也就是说，完备的约束系统，对外表现为一个刚体。

为了保证零件的几何模型经参数化修改后，其形状和几何实体间的拓扑结构关系不变，完备的约束是必需的。一般来讲，过约束图形是不能接受的，但不排除工程图中允许多余但不矛盾的尺寸标注，以帮助设计者看图。欠约束是广泛存在而且可以接受的，事实上在概念设计中，系统的初始状

态必然是欠约束的。在设计不断深化和细化的过程中，不断地对模型施加约束，使之逐步转变为完备的约束模型。为了支持概念设计，约束求解系统必须能够处理欠约束的情况。

3.3 参数化特征造型的基本方法

通常，对零件的参数化造型大致经过以下几个步骤。

(1) 规划零件

主要包括分析零件的特征组成，分析零件特征之间的相互关系，分析特征的构造顺序以及特征的构造方法。

(2) 创建基本体素特征

基本体素特征包括长方体、圆柱、球、圆锥或圆台。有一些零件，如定位销等，可以由这些简单的特征来构造。单纯用基本体素特征生成的零件是非常简单而且有限的。

(3) 创建参数化草图并生成相应的特征

草图是在平面上绘制的二维轮廓，以草图生成三维特征的方法包括：

1) 拉伸特征。拉伸特征是由一个二维轮廓沿一个方向拉伸一定距离形成的特征。封闭的二维轮廓可以生成一个拉伸体，不封闭的轮廓则只能生成一个拉伸面。一般的，系统还可以考虑在拉伸过程中加入一个拉伸角度，以形成一个带斜度的特征。拉伸方式有以下几种：单向拉伸、双向拉伸、从一个面拉到另一个面的拉伸等。

2) 旋转特征。旋转特征是一条二维母线绕一轴旋转形成的三维特征。最常见的旋转角是 360°，但也可以小于 360°。

3) 扫描特征。根据一个截面轮廓线和扫描轨迹线的草图，生成的复杂的特征。扫描方式有两种：垂直扫描和平行扫描。参数化草图是一个参数化特征，改变约束和尺寸的值可以改变草图的形状，就可以改变特征的形状。

(4) 特征的布尔运算

特征的布尔运算为并、交和差。通过布尔运算可以将多个特征并为一个特征，也可以在一个特征上，生成孔和凹槽。在进行特征的布尔运算时需要注意两个问题，一是布尔运算的顺序，二是避免因系统误差产生非正则实体，即产生拓扑结构异常的实体。

(5) 创建其他附加特征

在基本的特征生成后，定义零件上局部的附加特征，这些特征包括：

1) 孔特征。给定孔的位置和相关尺寸，如给定直径和深度可生成孔特征。孔包括通孔、不通孔、直孔和阶梯孔等。

2) 倒圆和倒角特征。在零件的两个表面之间倒圆和倒角，其中倒圆可分为等半径倒圆和变半径倒圆两种形式。

3) 阵列特征。阵列是把一个特征按照一定的规律进行复制，阵列包括圆周阵列和矩形阵列两种。

(6) 编辑修改特征

在特征造型中的任何时候都可以修改特征，包括修改特征的形状、尺寸、位置、改变特征的从属关系、拷贝特征和删除特征。一般的特征造型系统，以特征树表示特征以及特征的生成顺序和从属关系，特征的编辑和修改工作可直接在特征树上完成。如改变特征的生成顺序和从属关系，可以通过将特征从特征树上的位置前移和后移来完成。

4 装配建模技术

一副模具是由多个零件组成的，模具建模不仅要建立各零件的特征模型，还要建立零件之间的装配约束关系。在计算机中，将各种零件、部件组合在一起形成一个完整的装配体的过程称为装配建模。装配设计完成后，可以通过模具的运动仿真检测零件是否发生干涉，是否能正确地装配在一起，从而有效地保证模具设计质量。所以说，装配建模是模具 CAD 中重要的建模技术。

4.1 装配建模的基本概念

(1) 装配模型中零件位置关系的描述

一个零件在装配体中的位置可用相对于世界坐标系或某个参考零件的局部坐标系描述。模具装配的第一步就是建立模具的坐标系统。根据模具下模座在工作过程中固定不动的特点，可选用下模座底面中心点作为坐标系原点，建立模具坐标系，如图 9.5-17 所示。在设计中可以认为，模具坐标系和世界坐标系重合。建立模具坐标系，其余零件的位置可用相对于该参考零件的位置确定。

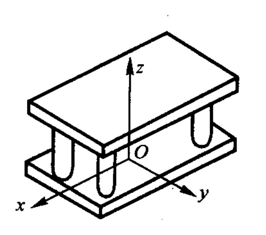


图 9.5-17 模具坐标系

下面以图 9.5-18 所示的例子，来说明零件之间的位置关系。如图所示，根结点为下模座，上模座与下模座由模具闭合高度来约束，凸模镶块装在下模座上，而凹模镶块装在上模座上。下模座的局部坐标系与世界坐标系重合，则相对变换 $M1 = I$，I 为单位矩阵。O_1xyz 与 O_3xyz 为相对于下模座的局部坐标系，相对变换矩阵分别为 $M2$，$M3$。同样，O_4xyz 是相对于上模座的局部坐标系，其相对变换矩阵为 $M4$。因此各零件由局部坐标系到世界坐标系下的变换矩阵分别为 $M10$，$M20$，$M30$，$M40$。

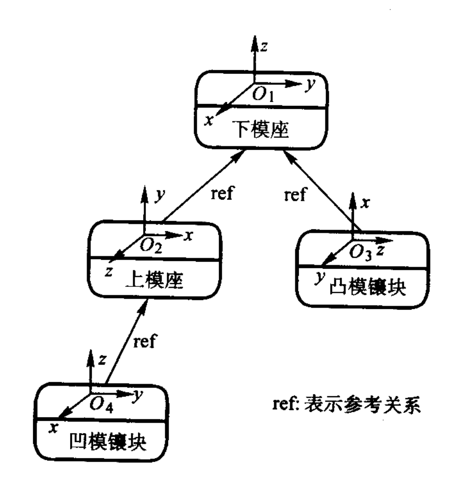


图 9.5-18 零件位置关系

下模座：$M10 = M1$

上模座：$M20 = M2$

凸模镶块：$M30 = M3$

凹模镶块：$M40 = M4 \times M2$

因为任一零件的变换矩阵都是相对于参考零件的，所以其相对变换矩阵不会影响其他零件的变换矩阵的内容，因此便于装配模型的操作，以及零件在装配体中的定位。

(2) 装配体中零件的定位

零件在装配体中的定位方法有两种，一种是通过零件的坐标变换矩阵定位，一种是通过三维几何约束求解定位。前



者需由设计者直接给出零件在装配中的位置，通过坐标变换，将零件加入到装配体中。采用这种方法，设计者需要通过目测或计算定出移动值、旋转量，还需随时检查和周围零件是否满足配合约束条件。当周围零件变化后，需要重新设置零件的位置。因而这种定位方法很不方便。实际上，这种方法由于没有定义零件之间的装配约束关系，所以并不是真正意义上的装配设计，装配设计中也较少采用。

在装配设计中零件定位常用的方法是采用三维几何约束求解。零件在装配体中的定位，可归结为定义零件上的几何元素与装配体中的几何元素之间的约束，涉及的几何元素包括点、线、面、基准点、基准面等，曲面一般不做为零件定位的几何元素。装配设计时在两个零件的几何元素之间定义约束关系，并求解满足这些约束关系的矩阵，然后把零件变换到满足约束的位置。

在装配建模中，零件的定位常用的装配操作有贴合、对齐和偏移三种，其中偏移可以归为贴合或对齐。

1）贴合就是相配合的两个面贴在一起，反向共面，如图9.5-19所示。

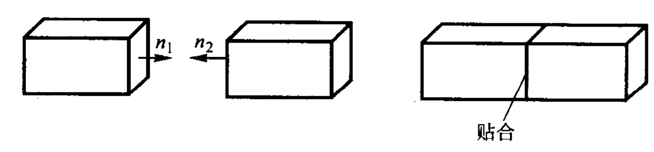


图9.5-19 面面贴合

2）对齐的含义较多，共线、线在面上、正向共面均属对齐。正向共面和贴合不同，前者是两个配合面的法向一致。图9.5-20所示为几种对齐的实例。

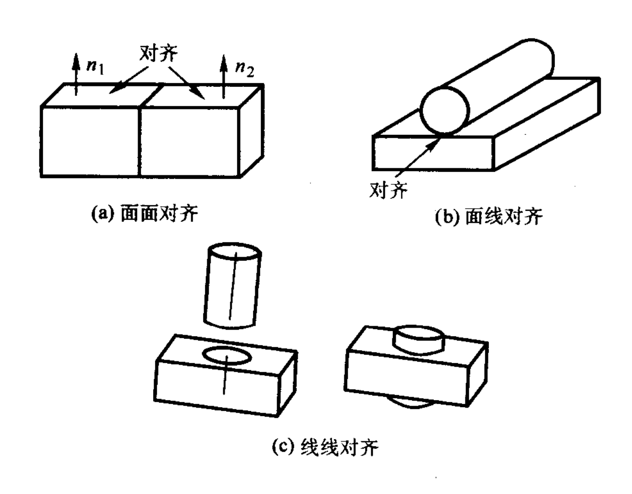


图9.5-20 对齐配合

3）偏移通常是用于平行关系，只要在贴合或对齐约束中增加一个距离参数，就可以表示偏移。贴合和对齐可以认为是偏移参数值为零的情况。

在模具设计中，一个零件在装配体中的位置常用尺寸显式表示，即标注零件的基准点与模具基准点（或为两条相互垂直的中心线）之间的水平和垂直距离。实际上，尺寸约束可以用上述贴合和对齐约束表示。从几何意义上讲，尺寸表示的是点、线、面三种几何元素之间的距离关系，包括点点距离、点线距离、点面距离、线线距离、线面距离和面面距离。贴合和对齐约束关系不包括点和其他几何元素的距离关系，这是因为在尺寸标注中能用于约束其他几何元素的点只能是基准点，而尺寸标注又具有明确的方向性，因而可以在基准点处构造由三个坐标平面构成的基准面，将其他几何元素与基准点的距离关系，转换为与基准面的距离关系。

（3）装配建模中的其他约束关系

在装配设计中，除了上述用几何约束表示的零件定位关系外，还包括零件之间形状上的相关性和相似性。如一个轴装配在一个孔中，轴的直径和孔的直径是相关的。在装配设计中，对形状上相关性约束的表示方法主要有以下两种：

1）设计变量约束。如图9.5-21所示导柱与导套的配合，由两个零件，即导柱（p1）和导套（p2）组成，其中导柱直径 d 与导套孔径 D 的公称尺寸相等。两者的关系可用设计变量表达式表示为 p1::d = p2::D，其中 p1 和 p2 分别为导柱和导套的零件名。

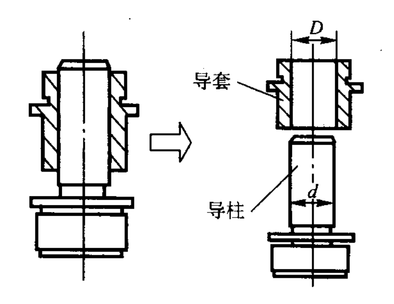


图9.5-21 设计变量约束的表示

2）相关特征拷贝。这种方法不是用尺寸建立零件之间形状上的关联，而是直接将一个零件的形状特征（如点、线、面、体）拷贝到另一个零件，成为该零件的一个特征，再由这些特征与零件的基本特征进行布尔运算，形成零件的特征模型，如图9.5-22所示。要将轴（p1）装配到板件（p2）上，轴和板件上的孔在形状上是关联的。此时，可将p1的轴拷贝到p2中，再用板和轴进行差运算，在板件上生成一个相应的孔，这样就建立了轴和孔形状之间的关联。

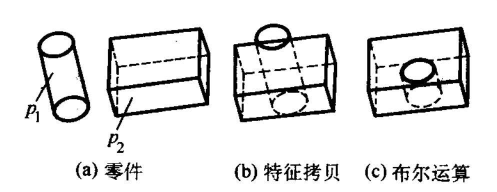


图9.5-22 相关特征拷贝

（4）装配树

一个复杂的产品是由多个部件所组成的，每个部件又可以根据复杂程度继续划分为下级子部件，如此类推，直到零件。这就是一种对产品的层次描述。这种层次关系可用一装配树来表示，树根表示整个装配体，树枝表示部件，树叶表示零件，如图9.5-23所示。装配树的每一个树叶对应一个零件，也可以有多个树叶指向同一零件。这种一个构件在装配模型中使用多次，称之为构件引用。构件引用有以下优点：

1）只需要存储构件的一个模型，大大减少模型占用的磁盘空间。

2）当某个构件修改后，所有引用该构件的装配模型都会自动更新，从而保证了设计结果的一致性。



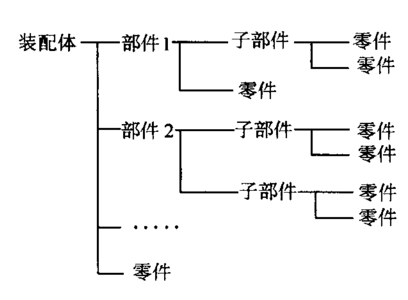


图 9.5-23　装配树

4.2　装配建模的一般方法

在进行产品的装配设计时，有两种典型的方法，一种是模仿实际产品的装配，即把事先制造好的零件装配成部件，再把零部件装配成产品。计算机辅助装配时也可以这样，先构造好所有的零件模型，然后把零件模型装配成子部件，然后装配成产品。这种由最底层的零件开始，并逐级向上进行装配建模的方法，称为“自下向上”的装配设计方法。

另一种截然相反的方法是模仿产品的开发过程，即先从总体设计开始，把产品分解为一系列的部件，并大致确定部件的结构和尺寸，然后进入部件设计，并继续大致确定部件中的各零件结构和尺寸，最后进行零件的详细设计。当零件设计完成了，产品的设计也基本完成了，这种装配建模方法称为“自下向上”的方法。

两种装配设计方法各有所长，并各有其应用场合。例如，在开展系列产品设计时，产品的零部件结构相对稳定，零件设计基础较好，大部分的零件模型已经具备，只需要补充部分设计或修改部分零件模型。这时，采用“自下向上”的装配设计方法就比较恰当。

在创新性设计中，事先零件结构细节不可能非常具体，设计时总是要从比较抽象笼统的装配模型开始，边设计边细化，边设计边修改，逐步求精。这时，就很难开展自下向上的设计，而必须采取自上而下的设计方法。这种方法也特别有利于这种创新性设计，因为这种设计能把握整体的设计情况，能着眼于零部件之间的关系，并且能够及时地发现、调整和方便地修改设计中的问题 。采取这种逐步求精的设计方法能实现设计的一次成功，提高设计效率，提高设计质量。

当然，两种方法不是截然分开的，完全可以根据实际情况综合应用这两种装配设计方法来开展产品设计，这就是所谓的“自中向外”的设计方法。这种方法有更大的灵活性和更大的运用范围。这种方法的特点是对现有的设计零件进行自下向上的装配，然后在装配树中设计新的子装配体，并在外部文件中设计子装配体中所需要的零件，最后把这些零件引入该子装配体中，并进行子装配体内部的约束装配以及子装配体和总装配体的约束装配。

4.3　基于功能组件的模具装配设计方法

(1) 功能组件的定义

在模具的装配设计中，按照一般的装配设计方法，要先建立零件的特征模型，同时在相关的零件上生成装配该零件所需的安装特征，如安装轴类零件时要先在模具本体上生成一个相应的孔，在一个异形表面上安装一个零件往往要生成一个平台等。由于这些安装特征的相关性，也可称为相关安装特征。考虑到相关安装特征和要安装的零件在形状上大多是相关的，因此可以将它和零件组合在一起进行设计，这就是基于功能组件的设计思想。

功能组件是具有特定功能的几何结构，这里的几何结构可以是一个装配体或一个零件。几何结构包括完成该功能的零件或部件的几何结构，以及相应的在模具本体上安装这些零件或部件的相关安装特征。功能组件包含三个方面的信息：

1）几何形状信息　它是指功能组件的几何信息和拓扑信息，主要指组成组件的零件或子装配的几何形状。

2）装配关系信息　装配关系是指组件中零件之间的装配关系。这些装配关系可以在组件定义过程中预定义。

3）相关安装信息　相关安装信息包括安装特征的几何形状、安装特征和零件或子装配的装配位置关系、安装特征在模具本体零件的关系。

模具设计中对已有结构的调用占很大的比例，将已知功能组件预先定义，并存入数据库，供设计时调用，这样有助于提高模具设计的自动化水平，从而提高模具设计效率。

(2) 用功能组件表示的装配关系

模具的装配关系是指模具零件之间的装配约束关系，也就是零件上特征之间的几何约束关系，定义这些约束关系就是模具装配设计的任务。在基于功能组件的模具装配设计系统中，相关安装特征是功能组件的一部分，因此无法用直接的方法定义零件上几何特征的约束关系。实际上功能组件在模具装配体上的位置关系，就是相关安装特征在基零件上的定位，即特征的定位。如图 9.5-24 所示，系统将相关安装特征定义为虚拟零件，在功能组件的定义中，预先建立组件中其他零件与虚拟零件的装配约束关系。在装配设计时可以定义虚拟零件与基零件的装配关系，也就是相关安装特征在基零件上的定位。最后，在基零件上产生相关安装特征的镜象，并通过布尔运算，生成基零件上的相关安装特征。这样在功能组件中定义的功能零件与虚拟零件的装配关系，即功能零件与相关安装特征的几何约束，就等于功能零件与模具基零件的装配约束关系。

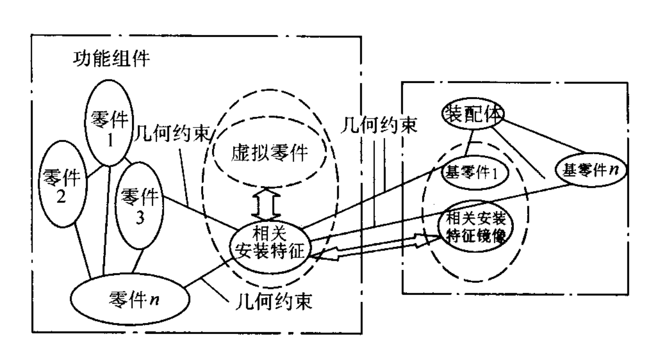


图 9.5-24　功能组件表示的模具装配关系

(3) 基于功能组件的装配设计过程

基于功能组件的装配主要是定义组件在装配体中的装配约束关系，在进行装配设计时，先从功能组件库中调用相应的功能组件，然后将功能组件装配（定位）到模具装配体中，生成模具装配体中零件之间的几何约束关系和变量约束关系，得到装配体的装配模型。同时，生成零件的相关安装特征。

基于功能组件的模具装配设计过程分为以下几个步骤。

1）功能组件的选取　从组件库中选取所需要的功能组件，这一过程可以交互完成，也可以根据模具的功能描述，自动匹配相应的功能组件。

2）功能组件的实例化　从组件库中选取的组件模型是一个模板文件，需要根据模具的具体尺寸，对功能组件重新赋值，并通过参数化驱动生成功能组件的一个实例。

3）定义装配约束关系　功能组件在模具装配体中的装配约束关系，实际上就是相关安装特征在基零件上的定位关

系。常用的装配定位操作是面面贴合和对齐。在实际设计中，尺寸是表示一个几何特征在模型中位置的主要描述手段，在系统中将尺寸关系表示为零件基准平面之间的距离关系。有时功能组件的局部坐标轴方向与模具坐标轴方向不一致，此时要特别注意，需要对功能组件旋转后定义基准平面的距离关系。

4）生成相关安装特征　相关安装特征是基零件的一个特征，在设计中要将它和基零件的基本特征连在一起组成基零件的特征模型。系统中，相关安装特征是功能组件定义中的一个虚拟零件，可以通过相关特征拷贝的方法，将其拷贝到基零件上，再与基零件的基本特征进行特征的布尔运算，最后形成基零件的特征模型。

5）生成装配模型　装配模型生成后，便定义了零件之间的约束关系。如果某个零件发生变化，系统可自动更新相关的零件特征模型。保证设计结果的一致性。

5　曲线与曲面

许多模具的工作型面为自由曲面，因此在模具的数控加工中不可避免地会涉及曲线和曲面的定义、描述和处理。例如，用曲线描述刃口模具的刃口形状，用曲面定义成形模具的工作型面等。在数控编程中，刀具轨迹的规划和刀位点的计算，也都需要处理有关的曲线或曲面。因此，处理曲线与曲面的数学方法对于模具的数控加工十分重要。这里将对数控加工中常用到的曲线、曲面及其数学描述进行介绍。

5.1　曲线

5.1.1　自由曲线的生成与参数方程

所谓自由曲线指的是不能用直线、圆弧和二次圆锥曲线描述的任意形状的曲线。自由曲线常用的生成方法是逼近和插值等方法。随着计算机技术的发展，自由曲线在机器人轨迹规划、航空航天、汽车、船舶、模具等流线型表面设计方面得到了广泛的应用。特别是非均匀有理 B 样条（NURBS），不仅能把规则物体和自由形状物体用统一的数学模型表达，而且能用样条精确地表示而不只是逼近规则形状的物体，从而为 CAD/CAPP/CAM 建立统一的几何模型提供了基础。

曲线可以用隐函数、显函数或参数方程表示。曲线用隐函数表示不直观，作图不方便；用显函数表示虽然简单直观，但存在多值性和斜率无穷大等问题。因此，隐函数、显函数只适合表达简单、规则的曲线。复杂的曲线如自由曲线一般表示成参数方程。

空间参数曲线可以看作是一个动点在空间的轨迹，可以用位置矢量 $\bar{r}(t)$ 连续不断地描述各瞬间位置，如图 9.5-25 所示。曲线的参数方程一般可写为：$\bar{r}(t)=\bar{r}(x(t), y(t), z(t))$ 的表达形式。工程常见的直线、圆弧、螺旋线等规则曲线也可用上述参数表达方法。本节讨论自由曲线的参数表达方法，并主要介绍 Ferguson 曲线、Bezier 曲线、B 样条曲线和 NURBS 曲线等表达方法。

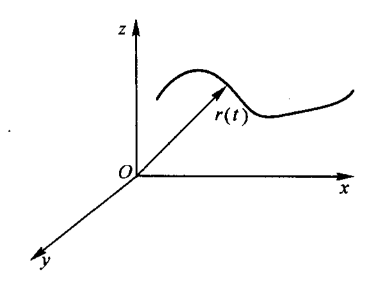


图 9.5-25　空间参数曲线

5.1.2　Ferguson 曲线

Ferguson 曲线也叫 Hermite 插值曲线。因为 Hermite 插值系数多项式为 k 次（$k \geqslant 1$）时，Hermite 插值多项式为 $(2k+1)$ 次。显然，Hermite 插值多项式最低为 3 次（或 4 阶）。设三次代数多项式

$$P(t) = At^3 + Bt^2 + Ct + D = [t^3 \quad t^2 \quad t \quad 1][A \quad B \quad C \quad D]^T \tag{9.5-1}$$

则三次 Ferguson 曲线上任意一点的坐标可表示为：

$$P(t) = [t^3 \quad t^2 \quad t \quad 1][M] \tag{9.5-2}$$

求 $[M]$ 矩阵的过程如下：已知某段曲线的起点和终点为 Q_0 和 Q_1，且 Q_0 和 Q_1 两点处曲线的切矢量为 Q'_0 和 Q'_1，如图 9.5-26 所示。

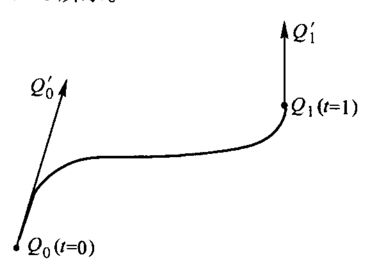


图 9.5-26　Fergugon 曲线

将 $t=0$ 和 $t=1$ 分别代入式 9.5-2 得

$$P(0) = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1][M] = Q_0$$

$$P(1) = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1][M] = Q_1$$

由式（9.5-2）对 t 求导数得

$$P'(t) = [3t^2 \quad 2t \quad 1 \quad 0][M] \tag{9.5-3}$$

将 $t=0$ 和 $t=1$ 分别代入式（9.5-3）得

$$P'(0) = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0][M] = Q'_0$$

$$P(1) = [3 \quad 2 \quad 1 \quad 0][M] = Q'_1$$

上述几个式子可以合写成：

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} [M] = \begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ Q'_0 \\ Q'_1 \end{bmatrix} \tag{9.5-4}$$

由此可得

$$[M] = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ Q'_0 \\ Q'_1 \end{bmatrix} \tag{9.5-5}$$

代入式（9.5-2）得 Ferguson 曲线方程如下：

$$P(t) = [t^3 \quad t^2 \quad t \quad 1] \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ Q'_0 \\ Q'_1 \end{bmatrix} \tag{9.5-6}$$

记为

$$P(t) = \boldsymbol{T}\boldsymbol{M}_c\boldsymbol{Q} \tag{9.5-7}$$

式中，$\boldsymbol{T}$、$\boldsymbol{M}_c$、$\boldsymbol{Q}$ 分别叫参数矩阵、代数矩阵和几何矩阵。

另外，Ferguson 曲线方程又可以写成：

$$P(t) = H_{00}(t)Q_0 + H_{01}(t)Q_1 + H_{10}(t) \times Q'_0 + H_{11}(t)Q'_1 \tag{9.5-8}$$

式中，$H_{00}(t)$、$H_{01}(t)$、$H_{10}(t)$ 和 $H_{11}(t)$ 称为调配函数（或权函数）。

上面是生成一段简单曲线的过程。如果要经过许多点构造一条由多段三次 Ferguson 曲线拼接而成的复杂曲线，只需保证其中每一段曲线的起点与前一段曲线的终点重合，并且

在重合点处两线段的切矢量方向相同。

Ferguson 曲线在早期的曲面设计中得到了应用，但它有许多缺点：一是设计条件与曲线始末两点的切矢量大小和方向有关，设计时不易控制；二是如果定义高次 Ferguson 曲线，需要用到曲线始末两点的高阶导数。为此，人们在 Ferguson 数学模型上作了一些改进，得到另外形式的曲线，Bezier 曲线就是其中一种。

5.1.3 Bezier 曲线

(1) Bezier 曲线方程

在上述 Ferguson 曲线表达式推导过程中，在切矢量 Q'_0 和 Q'_1 上的适当位置取两点 Q_{0e} 和 Q_{1e}，如图 9.5-27 所示，使之满足以下关系：

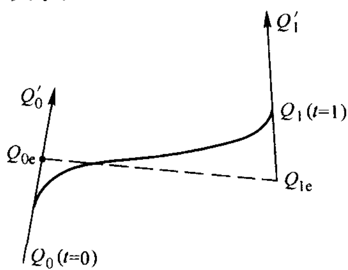


图 9.5-27 Fergugon 曲线

$$Q_{0e}=Q_0+Q'_0/p，即\ Q'_0=p(Q_{0e}-Q_0)$$
$$Q_{1e}=Q_1-Q'_1/p，即\ Q'_1=-p(Q_{1e}-Q_1)$$

点 Q_0，Q_{0e}，Q_1，Q_{1e} 都对曲线形状有影响，是控制曲线形状的控制顶点，多边形 $\overline{Q_0Q_{0e}Q_{1e}Q_1}$ 称为控制多边形或特征多边形。将上面两式代入式 (9.5-6) 得：

$$P(t)=[t^3\quad t^2\quad t\quad 1]\begin{bmatrix}2&-2&1&1\\-3&3&-2&-1\\0&0&1&0\\1&0&0&0\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}Q_0\\Q_1\\p(Q_{0e}-Q_0)\\-p(Q_{1e}-Q_1)\end{bmatrix}\quad(9.5\text{-}9)$$

整理后得：

$$P(t)=[t^3\quad t^2\quad t\quad 1]\begin{bmatrix}2-p&p&-p&-2+p\\-3+2p&-2p&p&-3-p\\-p&p&0&0\\1&0&0&0\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}Q_0\\Q_{0e}\\Q_{1e}\\Q_1\end{bmatrix}\quad(9.5\text{-}10)$$

上式与式 (9.5-6) 结构相似。也可写成与式 (9.5-8) 相似的结构，其中权函数为

$$\begin{cases}x_0(t)=(1-t^2)(1+(2-p)t)\\x_1(t)=pt(1-t)^2\\x_2(t)=pt^2(1-t)\\x_3(t)=t^2((3-p)+(p-2)t)\end{cases}\quad(9.5\text{-}11)$$

若用 Q_0，Q_1，Q_2，Q_3 分别表示 Q_0，Q_{0e}，Q_{1e}，Q_1，则可写为

$$P(t)=\sum_{i=0}^{3}(x_i(t)Q_i)\quad(9.5\text{-}12)$$

为了保证曲线的几何不变性（权性、非负性），应有下列关系成立

$$\begin{cases}x_0(t)+x_1(t)+x_2(t)+x_3(t)=1\\x_0(t)\geqslant 0\\x_1(t)\geqslant 0\\x_2(t)\geqslant 0\\x_3(t)\geqslant 0\end{cases}\quad(9.5\text{-}13)$$

当 p 取不同的值时，取矢量 Q'_0，Q'_1 长度不同（即控制点 Q_{0e}，Q_{1e} 位置不同），曲线形状也不同，分如下几种情况讨论：

1) 当 $p\to 0$ 时，曲线退化为直线段。

2) 当 $p=0\sim 3$ 时，p 越大，曲线越逼近控制多边形。

3) 当 $p>3$ 时，曲线不再保凸，即曲线不再位于控制多边形围成的凸包内，可能出现尖点或闭环（自相交），曲线特性变差。

所以，当取 $p=3$ 时，曲线最贴近控制多边形而不出现尖点和闭环。现将 $p=3$ 代入式 (9.5-11) 得权函数为

$$\begin{cases}x_0(t)=(1-t)^3\\x_1(t)=3(1-t)^2t\\x_2(t)=3(1-t)t^2\\x_3(t)=t^3\end{cases}\quad(9.5\text{-}14)$$

所以

$$P(t)=[t^3\quad t^2\quad t\quad 1]\begin{bmatrix}-1&3&-3&1\\3&-6&3&0\\-3&3&0&0\\1&0&0&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}Q_0\\Q_1\\Q_2\\Q_3\end{bmatrix}\quad(9.5\text{-}15)$$

仿式 (9.5-7)，记为

$$P(t)=\boldsymbol{TM_BQ}\quad(9.5\text{-}16)$$

由四个控制点定义一条三次 *Bezier* 曲线，如图 9.5-28 所示。

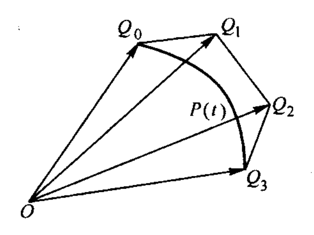


图 9.5-28 三次 Bezier 曲线

伯恩斯坦 (Bernstein) 定义了一种函数 $B_{i,n}(t)=C_n^i(1-t)^{n-i}t^i$，$n$ 为基本曲线的次数，i 为基函数的序号。对 n 次 Bezier 曲线，可以写成如下通式：

$$P(t)=\sum_{i=0}^{n}C_n^i(1-t)^{n-1}t^iQ_i=\sum_{i=0}^{n}B_{i,n}Q_i\quad(9.5\text{-}17)$$

由上述通式很容易导出一、二次及高次 Bezier 曲线方程。

(2) Bernstain 基函数的性质

由排列组合和导数运算有关规律可以推导出 Bernstain 基函数如下性质。

1) 正性（非负性）：$B_{i,n}=C_n^i(1-t)^{n-1}t^i\geqslant 0$。

2) 权性：$\sum_{i=0}^{n}B_{i,n}(t)=1$。

3) 对称性：$B_{i,n}(t)=B_{n-i,n}(1-t)$。

4) 导数递推性：$B'_{i,n}(t)=n[B_{i-1,n-1}(t)-B_{i,n-1}(t)]$。

5) 函数递推性：$B_{i,n}(t)=(1-t)B_{i,n-1}(t)+tB_{i-1,n-1}(t)$。



(3) Bezier 曲线的主要性质

由 Bezier 曲线方程和 Bernstain 基函数的性质可以得出 Bezier 曲线的一些性质。

1) 端点的特性

① 位置：曲线首尾端点分别经过折线多边形的首末点，即 $p(0)=Q_0$，$p(1)=Q_n$。

② 切矢：由 $B_{i,n}(t)$ 函数的导数性质，可以推出

$$P'(t)=n\sum_{i=0}^{n}(B_{i-1,n-1}(t)-B_{i,n-1}(t))$$
$$=n\sum_{i=0}^{n}[B_{i-1,n-1}(t)(Q_i-Q_{i-1})]$$

所以，起点和终点切矢分别为 $P'(0)=n(Q_1-Q_0)$，$P'(1)=n(Q_n-Q_{n-1})$。

2) 对称性。由 Bernsrein 基函数的对称性可知，控制点的走向 $Q_0\to Q_1\to Q_2\to Q_3$ 颠倒后，曲线形状不变，但走向相反。

3) 凸包性。Bernsrein 曲线位于其控制顶点 Q_0 到 Q_n 组成的凸包中（这是由 Bernstein 基函数的正性与权性保证的）。

4) 保凸性。如果平面控制多边形是凸的（即多边形的任意两个顶点的连线都在多边形内或其边界上），则 Bezier 曲线也是凸的。

5) 几何不变性。曲线的形状不随坐标系的变化而变化。

6) 变差减少性。任意一平面与 Bezier 曲线的交点个数不多于该平面与控制多边形的交点个数，这说明曲线比控制多边形的波动小（更光顺）。

(4) Bezier 曲线的拼接

复杂 Bezier 曲线是通过多段简单 Bezier 曲线拼接而成的，两段曲线首末相连时，根据在连接点处的连续性条件不同，常分为以下几种几何连续（GC）情况。

1) GC^0。零阶几何连续，即第一段曲线末点与第二段曲线起点重合。设两段曲线的起点和末点分别为 Q_{10}，Q_{1n}，Q_{20}，Q_{2n}，则 $Q_{1n}=Q_{20}$。对 Bezier 曲线而言，如果后一段曲线的第一个控制点与前一段曲线的最后一个控制点重合，那么两段曲线是 GC^0 连续的。

2) GC^1。一阶几何连续，即同时满足 $Q_{1n}=Q_{20}$ 和 $Q'_{1n}(t)=\lambda Q'_{20}(t)$。对 Bezier 曲线而言，如果后段曲线的第一个控制点与前一段曲线的最后一个控制点重合，并且后一段曲线的控制多边形的第一条边与前一段曲线的控制多边形的最后一条边在一条直线上，那么两段曲线是 GC^1 连续的。

3) GC^2。二阶几何连续，即当

$$\begin{cases}Q_{1n}=Q_{20}\\ Q'_{1n}(t)=\lambda Q'_{20}(t)\end{cases}$$

且曲线的主法矢 $\overline{N}_{Q1n}$ 与 $\overline{N}_{Q20}$ 方向一致，以及曲率 $K_{Q1n}=K_{Q20}$ 时，则曲线是二阶几何连续。

(5) Bezier 曲线的修改

以四次 Bezier 曲线为例，如图 9.5-29 所示。图中修改 Q_2 点至 Q_2^*，修改前的曲线方程为：

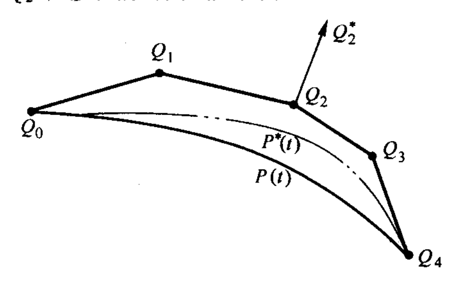


图 9.5-29 Beizer 曲线的修改

$$P(t)=Q_0B_{0,4}(t)+Q_1B_{1,4}(t)+Q_2B_{2,4}(t)+$$
$$Q_3B_{3,4}(t)+Q_4B_{4,4}(t)=\sum_{i=0}^{4}Q_iB_{i,4}(t)$$

修改量 $\Delta Q_2=Q_2^*-Q_2$，修改后曲线方程为：

$$P^*(t)=Q_0B_{0,4}(t)+Q_1B_{1,4}(t)+(Q_2+\Delta Q_2)B_{2,4}(t)+Q_3B_{3,4}(t)+Q_4B_{4,4}(t)$$
$$=P(t)+\Delta Q_2B_{2,4}(t)$$

因为 $t\in(0,1)$，$\Delta Q_2B_{2,4}(t)\neq 0$。所以修改一个控制点后，曲线上任意点都要迭加分量 $\Delta Q_2\cdot B_{2,4}(t)$，在整个参数区域内，$P(t)$ 曲线都会发生变化，所以曲线局部可操作性不好，修改曲线不方便。

(6) Bezier 曲线控制顶点的反求

曲线控制顶点的反求是指由曲线上的一系列点（称之为型值点）反求出定义该曲线的一系列控制顶点的过程。由实物模型测量数据后，求产品的计算机描述数据（如由汽车油泥模型测量数据求车身外形的控制点数据就是曲线的反求过程）。

如果给定 $(n+1)$ 个型值点 P_0，P_1，P_2，$\cdots P_n$，要求一系列控制点，由这些控制点定义的一条 Bezier 曲线通过已知的型值点，这与平常给定控制点求型值点的过程恰好相反。为了确定特征多边形的顶点 Q_i，可以取参数 $t_i=i/n$，它们分别与型值点 P_i $(i=0,1,2,\cdots,n)$ 对应。于是，根据 Bezier 的方程和性质，可列出如下方程组：

$$P_i=C_n^0(1-i/n)^nQ_0+C_n^1(1-i/n)^{n-1}(i/n)Q_1+\cdots C_n^n(i/n)^nQ_n\quad(i=0,1,2,\cdots,n)$$

上述方程组有 Q_0，Q_1，Q_2，$\cdots$，Q_n 共 $(n+1)$ 个未知数，有 $n+1$ 个方程，故可以得出唯一组解（Q_0，Q_1，Q_2，$\cdots$，Q_n）。应注意的是，参数 t 的取法不一样，得到的控制点序列也不一样，由于这些点都逼近 Bezier 曲线，但逼近的精度有所不同，即反求的解并不唯一。

Bezier 曲线在自由曲线的设计上得到了广泛的应用，但也存在一些不足，主要是存在着以下几个问题：

1) 很复杂的 Bezier 曲线不分段时，如果控制多边形的顶点数为 $(n+1)$，也就定义了曲线的次数为 n。一般控制多边形的顶点数较多，因而曲线的次数很高，数学计算很复杂。采用分段 Bezier 曲线时，如果要求拼接达到 GC^2 连续，连续条件的计算也相当繁琐。

2) 权函数在开区间 (0，1) 内均不为零，因此所定义的曲线在开区间的任何一点均要受所有顶点的影响，即改变其中任一个顶点的位置对整段曲线都有影响。因而，不便对曲线进行局部修改。

3) 当曲线的次数 n 较大即控制多边形边数较多时，多边形对曲线的控制减弱，即逼近曲线的程度减弱。

为了克服上述问题，人们提出了 B 样条基函数替代 Bernstein 基函数，从而出现了 B 样条曲线。

5.1.4 B 样条曲线

B 样条曲线保持了 Bezier 的直观性、凸包性等优点外，还具有便于局部修改、对特征多边形逼近程度高、多项式次数低、分段曲线拼接条件简单等特点。

(1) B 样条曲线的数学模型

样条曲线基函数为

$$X_{i,n}(t)=\frac{1}{n!}\sum_{j=0}^{n-i}(-1)^jC_{n+1}^j(t+n-i-j)^n$$
$$(0\leqslant t\leqslant 1,\ i=0,1,\cdots,n)\qquad(9.5\text{-}18)$$

式中，i 为基函数的序号；n 为样条的次数；j 为一个基函数的项数。

1) 二阶一次 B 样条曲线

将 $n=1$ 代入式 (9.5-18) 得

$$X_{0,1}(t)=1-t$$

$$X_{1,1}(t)=t$$

两个控制点定义一段 B 样条曲线，如果给定一系列控制点，则第 i 段 B 样条曲线方程为

$$P_i(t)=(1-t)Q_{i-1}+tQ_i=\sum_{j=0}^{1}X_{j,1}(t)Q_{-1+j+i} \tag{9.5-19}$$

显然，此时曲线是直线段，就是特征多边形的边，移动控制顶点 Q_i，只影响 $\overline{Q_iQ_{i-1}}$，$\overline{Q_iQ_{i+1}}$ 二段，如图 9.5-30 所示。

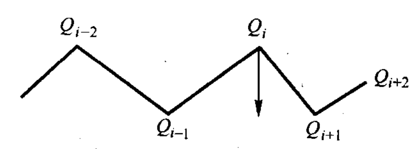


图 9.5-30　一次 B 样条曲线

2）三阶二次 B 样条曲线

将 $n=2$ 代入上式 9.5-18 得

$$X_{0,2}(t)=\frac{1}{2}(t-1)^2=\frac{1}{2}t^2-t+\frac{1}{2}$$

$$X_{1,2}(t)=\frac{1}{2}(-2t^2+2t+1)=-t^2+t+\frac{1}{2}$$

$$X_{2,2}(t)=\frac{1}{2}t^2$$

第 i 段曲线方程为

$$P_i(t)=X_{0,2}Q_{i-1}+X_{1,2}Q_i+X_{2,2}Q_{i+1}=\sum_{j=0}^{2}X_{j,i}(t)Q_{-1+j+i}$$

$t=0$ 时，$P_i(0)=(0-0+\frac{1}{2})Q_{i-1}+(0-0+\frac{1}{2})Q_i+0Q_{i+1}=(Q_{i-1}+Q_i)/2$

$t=1$ 时，$P_i(1)=(\frac{1}{2}-1+\frac{1}{2})Q_{i-1}+(-1+1+\frac{1}{2})Q_i+\frac{1}{2}Q_{i+1}=(Q_i+Q_{i+1})/2$

因此，P_i 段二次 B 样条曲线由 Q_{i-1}，Q_i，Q_{i+1} 三个控制点定义，P_{i+1} 段曲线由 Q_i，Q_{i+1}，Q_{i+2} 三个控制点定义（即往后顺移一个控制点）。

曲线端点切矢的基函数为

$$X_{0,2}'(t)=t-1$$

$$X_{1,2}'(t)=-2t+1$$

$$X_{2,2}'(t)=t$$

曲线端点切矢为

$$P'_i(0)=(0-1)Q_{i-1}+(-2\times0+1)Q_i+0\cdot Q_{i+1}=Q_i-Q_{i-1}$$

$$P'_i(1)=(1-1)Q_{i-1}+(-2\times1+1)Q_i+1\cdot Q_{i+1}=Q_{i+1}-Q_i$$

基函数的二阶导数为

$$X''_{0,2}(t)=1$$

$$X''_{1,2}(t)=-2$$

$$X''_{2,2}(t)=1$$

所以曲线端点的二阶导数为

$$P''_i(0)=P''_i(1)=Q_{i-1}-2Q_i+Q_{i+1}$$

图 9.5-31 所示为 Q_0、Q_1、Q_2 和 Q_3 四个控制点构成的二次 B 样条曲线。

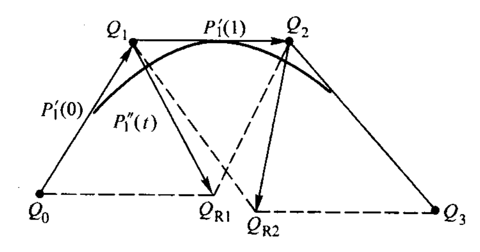


图 9.5-31　二次 B 样条曲线

3）四阶三次 B 样条曲线

将 $n=3$ 代入式（9.5-18）得

$$X_{0,3}(t)=\frac{1}{6}(-t^3+3t^2-3t+1)$$

$$X_{1,3}(t)=\frac{1}{6}(3t^3-6t^2+4)$$

$$X_{2,3}(t)=\frac{1}{6}(-3t^3+3t^2+3t+1)$$

$$X_{3,3}(t)=\frac{1}{6}t^3$$

所以 $P_i(t)=X_{0,3}(t)Q_{i-1}+X_{1,3}(t)Q_i+X_{2,3}(t)Q_{i+1}+X_{3,3}(t)Q_{i+2}=\sum_{j=0}^{3}X_{j,i}(t)Q_{-1+j+i}$

即

$$P_i(t)=\boldsymbol{TM_sQ} \tag{9.5-20}$$

式中，$\boldsymbol{T}$，$\boldsymbol{Q}$ 如前述，而 $\boldsymbol{M_s}$ 为

$$\boldsymbol{M_s}=\begin{bmatrix}-\frac{1}{6} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{6}\\ \frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{2} & 0\\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0\\ \frac{1}{6} & \frac{2}{3} & \frac{1}{6} & 0\end{bmatrix}$$

（2）三次 B 样条曲线几何性质

1）端点特性

①位置：将 $t=0$ 代入式（9.5-20），得

$$P_i(0)=\frac{1}{6}Q_{i-1}+\frac{2}{3}Q_i+\frac{1}{6}Q_{i+1}=Q_i+\frac{1}{6}(Q_{R1}-Q) \tag{9.5-21}$$

式中，$Q_{R1}=(Q_{i-1}-Q_i)+(Q_{i+1}-Q_i)$，即为图 9.5-32 所示的平行四边形的对角线。

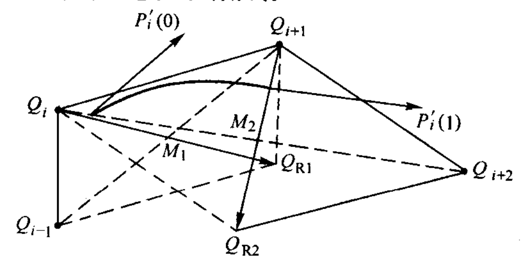


图 9.5-32　三次 B 样条曲线

将 $t=1$ 代入式（4.2-20），得

$$P_i(1)=Q_{i+1}+\frac{1}{6}(Q_{R2}-Q_{i+1}) \tag{9.5-22}$$

式中，$Q_{R2}=(Q_i-Q_{i+1})+(Q_{i+2}-Q_{i+1})$

式（9.5-21）、式（9.5-22）描述了三次 B 样条曲线的起、终点与控制点之间的关系，第 i 段三次 B 样条曲线只与 Q_{i-1}、Q_i、Q_{i+1} 和 Q_{i+2} 四个控制点有关，如图 9.5-32 所示。



曲线始点位于 $\Delta Q_{i-1}Q_iQ_{i+1}$ 的中线 Q_iM_1 的 1/3 处，或平行四边形 $Q_{i-1}Q_iQ_{i+1}Q_{R1}$ 对角线 Q_iQ_{R1} 的 1/6 处。曲线终点位于 $\Delta Q_iQ_{i+1}Q_{i+2}$ 的中线 $Q_{i+1}M_2$ 的 1/3 处，或平行四边形 $Q_iQ_{i+1}Q_{i+2}Q_{R2}$ 对角线 $Q_{i+1}Q_{R2}$ 的 1/6 处。

② 一阶切矢：将式（9.5-20）对 t 求导，得

$$P'_i(t) = \sum_{j=0}^{3} X'_{j,3}(t)\ Q_{-1+j+i}$$

$$P'_i(0) = \frac{1}{2}(Q_{i+1} - Q_{i-1})$$

$$P'_i(1) = \frac{1}{2}(Q_{i+2} - Q_1)$$

即曲线在端点处的切矢量分别平行于三角形 $\Delta Q_{i-1}Q_iQ_{i+1}$ 和 $\Delta Q_iQ_{i+1}Q_{i+2}$ 的底边，等于三角形底边长的一半。

③ 二阶切矢。将式（9.5-20）对 t 求二阶导数，得到

$$P''_i(t) = \sum_{j=0}^{3} X''_{j,3}(t)\ Q_{-1+j+i}$$

则

$$P''_i(0) = Q_{R1} - Q_i$$

即为平形四边形 $Q_{i-1}Q_iQ_{i+1}Q_{R1}$ 的对角线 Q_iQ_{R1}。

而

$$P''_i(1) = Q_{R2} - Q_{i+1}$$

即为平形四边形 $Q_iQ_{i+1}Q_{i+2}Q_{R2}$ 的对角线 $Q_{i+1}Q_{R2}$。

由于第 P_i 段曲线由（Q_{i-1}、Q_i、Q_{i+1}、Q_{i+2}）定义，第 P_{i+1} 段曲线由（Q_i、Q_{i+1}、Q_{i+2}、Q_{i+3}）定义（即往后顺移一个控制点），所以后一个平行四边形正好是下一段曲线的前一个平行四边形，即 $P''_i(1) = P''_{i+1}(0)$，所以三次 B 样条曲线自动满足 GC^2 连续条件。对三次 B 样条，N 个控制点可定义（$N-3$）段曲线。

2）局部特性。每四个控制点定义一段三次 B 样条曲线，如图 9.5-33 所示。改变某一个控制点（如 Q_4），只对图中实线表示的四段 B 样条曲线有影响。一般地，K 次 B 样条基函数只在($K+1$)个曲线区间非零，其余区域为零，即改变一个控制点，只对（$K+1$）条段 B 样条曲线有影响。这体现了 B 样条曲线的局部可修改性。

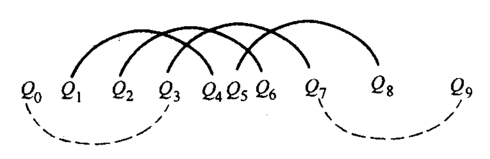


图 9.5-33　三次 B 样条曲线的局部修改特性

3）几种特殊情况讨论

① 四点共线。当 Q_{i-1}、Q_i、Q_{i+1}、Q_{i+2} 四个顶点位于同一直线上时，上面所提到的平行四边形都蜕化为一直线，$P_i(t)$ 也为一直线。因此，利用这一性质可以在两段曲线之间设计一段直线。

② 三重顶点。如果三个控制点重合，则曲线在此处构成尖点。

③ 四重顶点。如果四个控制点重合，则曲线退化为一点。

(3) 三次 B 样条曲线的反求

三次 B 样条曲线的型值点的个数比控制点的个数少两个，如果已知（$n+1$）个型值点 P_i（$i=0, 1, \cdots, n$），如何反求出（$n+3$）个控制点 Q_j（$j=-1, 0, \cdots, n+1$），这就是三次 B 样曲线的反求问题。显然，必须补充 2 个几何条件，才能求解。

由前面推导得知，型值点与控制点存在着下列关系：

$$\frac{1}{6}Q_{i-1} + \frac{2}{3}Q_i + \frac{1}{6}Q_{i+1} = P_i \qquad (i=0, 1, \cdots, n)$$

补充条件的方法有如下两种：

1）对开曲线。设其两端点曲率为 0，可以设计成二重顶点，即

$Q_{-1} = Q_0$，$Q_{n+1} = Q_n$，或 $6Q_{-1} - 6Q_0 = 0$；$6Q_{n+1} - 6Q_n = 0$。

将（$n+3$）个方程写成矩阵的形式：

$$\begin{bmatrix} 6 & -6 & & & & & 0 \\ 1 & 4 & 1 & & & & \\ & 1 & 4 & 1 & & & \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & & 1 & 4 & 1 \\ 0 & & & & & 6 & -6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{-1} \\ Q_0 \\ \vdots \\ \vdots \\ Q_n \\ Q_{n+1} \end{bmatrix} = 6 \begin{bmatrix} 0 \\ P_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ P_n \\ 0 \end{bmatrix}$$

对上述方程组，可利用追赶法求解。

2）对闭曲线。曲线首尾封闭不是简单封闭，控制点必须沿环向重叠一部分，即取 $Q_{-1} = Q_n$，$Q_{n+1} = Q_0$，则得到

$$\begin{bmatrix} 6 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & -6 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ & & & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & & 1 & 4 & 1 & \\ 0 & 6 & 4 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & -6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{-1} \\ Q_0 \\ \vdots \\ \vdots \\ Q_n \\ Q_{n+1} \end{bmatrix} = 6 \begin{bmatrix} 0 \\ P_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ P_n \\ 0 \end{bmatrix}$$

可以用迭代法求解上述方程组。

5.1.5　非均匀有理 B 样条（NURBS）曲线

近年来，随着 CAD/CAM 的发展，非均匀有理 B 样条（NURBS）技术得到较快的发展和较广泛的应用，其主要原因在于：①NURBS 为解析曲线（如圆锥曲线等）和自由曲线提供了统一的数学描述，便于工程数据管理和应用；②保留了 B 样条曲线的节点插入、修改、分割以及修改控制点等强有力的技术，而且还具有通过修改权因子来修改曲线形状的能力；③具有几何变换不变性；④均匀 B 样条曲线和 Bezier 曲线等均为 NURBS 曲线的表示特例。因此，NURBS 曲线具有更强的表达功能。

NURBS 曲线的定义如下：给定 $n+1$ 个控制点 P_i（$i=0, 1, \cdots, n$）及其权因子 W_i（$i=0, 1, \cdots, n$），则 K 阶（$K-1$）次 NURBS 曲线的表达式为：

$$C(u) = \sum_{i=0}^{n} W_iP_iN_{i,k}(u) \Big/ \sum_{i=0}^{n} W_iN_{i,k}(u)$$

式中 P_i 也称之为特征多边形顶点位置矢量。

$N_{i,k}(u)$ 是 K 阶 B 样条基函数，按照递推方式可定义为：

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & 若\ u_i \leqslant u < u_{i+1} 或\ u \in [u_i,\ u_{i+1}] \\ 0 & 其他 \end{cases}$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i}N_{i,k-1}(u) + \frac{(u_{i+k+1} - u)}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u)$$

上式中 u_i 为结点值，$U = [u_0 \quad u_1 \quad \cdots u_{n+k+1}]$ 构成了 K 阶 B 样条基函数的结点矢量，结点值必须是增序列，即 $u_{i+1} > u_i$。当结点沿参数轴是均匀分布时，即 $u_{i+1} - u_i$ = 常数，则 B 样条基函数为均匀 B 样条基函数。在实际工程应用中，通常取

$$u_0 = u_1 = \cdots = u_{k-1} = \alpha = 0$$

$$u_{n+2} = u_{n+3} = \cdots = u_{n+k+1} = \beta = 1$$

即取结点矢量 $U \in [0, 1]$ 且两端按 K 重结点取值，这样曲线起点和终点就是控制多边形的起点和终点；且起、终点的切矢量相切于控制多边形的第一条边和最后一条边。例如用 NURBS 曲线表达圆时，其特征多边形顶点 P_i（$i=0$,



…，8）按图 9.5-34 所示的矩形分布，每个控制点的权值为

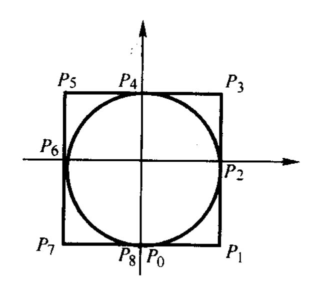


图 9.5-34　NURBS 曲线表达的圆

$$[W_0\quad W_1\quad W_2\quad W_3\quad W_4\quad W_5\quad W_6\quad W_7\quad W_8] = \left[1\quad \frac{1}{\sqrt{2}}\quad 1\quad \frac{1}{\sqrt{2}}\quad 1\quad \frac{1}{\sqrt{2}}\quad 1\quad \frac{1}{\sqrt{2}}\quad 1\right]$$

其节点矢量

$$U=\left[0\quad 0\quad 0\quad \frac{1}{4}\quad \frac{1}{4}\quad \frac{1}{2}\quad \frac{1}{2}\quad \frac{3}{4}\quad \frac{3}{4}\quad 1\quad 1\quad 1\right]$$

尽管 NURBS 曲线有许多优点，但由于其表达式较前述几种自由曲线的表达式更为复杂，因此其计算量较大，影响软件的运行速度，耗费的存贮量较大。而且，当权因子为零和负值时容易引起计算的不稳定，导致曲线发生畸变，因此在使用 NURBS 时应有适当的限制以保证算法的稳定性。

5.2　曲面

5.2.1　概述

一些复杂的物体表面，如汽车车身、飞机机身、模具型面等都是呈流线型的自由曲面。与自由曲线的定义相似，所谓自由曲面是指不能用基本立体要素（棱柱、棱锥、球、一般回转体、有界平面等）描述的呈自然形状的曲面，必须根据空间自由曲线和自由曲面的理论进行计算。传统的自由曲面设计一般采用放样（Lofting）方法，即对曲面取不同的截面，得到平面截交线，用水平线（Water Line）、铅直线（Station Line）组成的矩形网格对截面线上的点进行定位。由于这种方法中网络线的密度不可能无限，对放样曲线上的点的确定，有时由人的经验而定，存在较大的误差，且不适合计算机表达，为此引入了参数曲面的概念。与参数曲线的定义类似，参数曲面可看成是一条曲线 $\bar{r}=\bar{r}(u)$ 按某参数 v 运动形成的轨迹，即参数曲面可表示为 $\bar{r}(u,v)=[x(u,v),y(u,v),z(u,v)]$。规则曲面的参数表达式也具有这种双参数形式。

参数曲面的切矢、切平面、法矢是参数曲面加工和检测中需要用到的重要特征，知道曲面参数方程后，可以求出曲面的 u 向切矢和 v 向切矢。

u 向切矢：

$$\bar{r}'_u(u,v)=\left[\frac{\partial x(u,v)}{\partial u},\frac{\partial y(u,v)}{\partial u},\frac{\partial z(u,v)}{\partial u}\right]$$

v 向切矢：

$$\bar{r}'_v(u,v)=\left[\frac{\partial x(u,v)}{\partial v},\frac{\partial y(u,v)}{\partial v},\frac{\partial z(u,v)}{\partial v}\right]$$

因此，曲面上一点 P_0 处的切平面方程为：

$$\bar{T}(u,v)=\bar{P}_0+u\bar{r}'_u+v\bar{r}'_v$$

曲面的法矢为：

$$\bar{N}(u,v)=\bar{r}'_u\times\bar{r}'_v$$

切平面方程也可写成：

$$\bar{T}(u,v)=\bar{P}_0(u,v)\cdot\bar{N}(u,v)=0$$

与 Ferguson 曲线、Bezier 曲线和 B 样条曲线对应，工程常用的自由曲面有 Coons 曲面、Bezier 曲面和 B 样条曲面。自由曲线的表达结构可以理解为调配函数对控制点进行一次调配，是单参数函数。自由曲面的构造与自由曲线的构造策略相似，它可以看成是自由曲线的“单参数”、“一次调配”向“双参数”、“二次调配”的拓展，即先通过参数 u 将点调配成曲线，然后通过参数 v 将曲线调配成曲面。因此，参数曲面方程可以写成：

$$P(u,v)=(x(u,v),y(u,v),z(u,v))=\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}X_i(u)Q_{ij}X_j(v)\qquad(9.5\text{-}23)$$

式中，m 为关于参数 u 的调配函数的次数；n 为关于参数 v 的调配函数的次数；$m\times n$ 称为曲面的次数；$X_i(u)$ 和 $X_j(v)$ 为关于参数 u 和参数 v 的调配函数（两者的结构相同）；Q_{ij} 为给定的已知几何条件。

如果式（9.5-23）的 $X_i(u)$、$X_j(v)$ 和 Q_{ij} 取与 B 样条曲线相似的基函数和几何条件时，式（9.5-23）即为 B 样条曲面方程。下面分别介绍 3×3 次 Coons 曲面、Bezier 曲面和 B 样条曲面。

5.2.2　Coons 曲面

由前面分析，已知三次 Ferguson 曲线的基函数为 $X=[u^3\quad u^2\quad u\quad 1]\times M_c$，代入式（9.5-23），得到双三次 Coons 曲面的方程

$$P(u,v)=[u^3\quad u^2\quad u\quad 1]\,\boldsymbol{M}_c\boldsymbol{Q}_{ij}\boldsymbol{M}_c^{\mathrm{T}}\,[v^3\quad v^2\quad v\quad 1]^{\mathrm{T}}\qquad(9.5\text{-}24)$$

其中

$$\boldsymbol{M}_c=\begin{bmatrix}2&-2&1&1\\-3&3&-2&-1\\0&0&1&0\\1&0&0&0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{Q}_{ij}=\begin{bmatrix}Q_{00}&Q_{01}&Q_{00}^v&Q_{01}^v\\Q_{10}&Q_{11}&Q_{10}^v&Q_{11}^v\\Q_{00}^u&Q_{01}^u&Q_{00}^{uv}&Q_{01}^{uv}\\Q_{10}^u&Q_{11}^u&Q_{10}^{uv}&Q_{11}^{uv}\end{bmatrix}$$

这里，几何矩阵 $\boldsymbol{Q}_{ij}$ 是一个 4×4 的矩阵，它的 16 个元素中，四个是曲面的四个角点 Q_{00}、Q_{01}、Q_{10}、Q_{11}，如图 9.5-35 所示；四个是曲面四个角点处的 u 向切矢（一阶偏导）Q_{00}^u、Q_{01}^u、Q_{10}^u、Q_{11}^u；四个是曲面四个角点的 v 向切矢（一阶偏导）Q_{00}^v、Q_{01}^v、Q_{10}^v、Q_{11}^v；四个是曲面四个角点处的扭矢（二阶偏导）Q_{00}^{uv}、Q_{01}^{uv}、Q_{10}^{uv}、Q_{11}^{uv}。同 Ferguson 曲线一样，设计 Coons 曲面时，需要用到切矢，而且还要用到扭矢，不直观，而且难于控制，因此 Coons 曲面的应用受到限制。

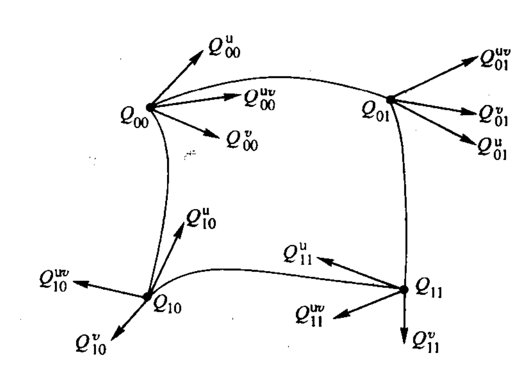


图 9.5-35　Coons 曲面



5.2.3 Beizer 曲面

由前面分析，已知三次 Beizer 曲线的基函数为 $X=[u^3\quad u^2\quad u\quad 1]\times M_B$，代入式（9.5-23）得双三次 Beizer 曲面方程

$$P(u,v)=[u^3\quad u^2\quad u\quad 1]\,M_B Q_{ij} M_B^T\,[v^3\quad v^2\quad v\quad 1]^T \tag{9.5-25}$$

$$M_B=\begin{bmatrix}-1 & 3 & -3 & 1\\ 3 & -6 & 3 & 0\\ -3 & -3 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

$$Q_{ij}=\begin{bmatrix}Q_{00} & Q_{01} & Q_{02} & Q_{03}\\ Q_{10} & Q_{11} & Q_{12} & Q_{13}\\ Q_{20} & Q_{21} & Q_{22} & Q_{23}\\ Q_{30} & Q_{31} & Q_{32} & Q_{33}\end{bmatrix}$$

Q_{ij}（$i,j=0,1,2,3$）是由空间的 16 个控制点组成的矩阵，即空间控制网格，如图 9.5-36 所示，控制网格（图中实线）的四个角点与曲面（图中虚线）的四个角点重合，其余控制点都不在曲面上。

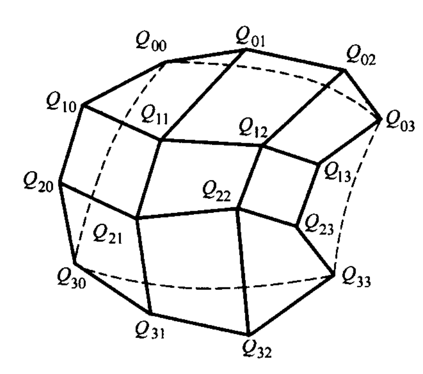


图 9.5-36　Bezier 曲面

5.2.4 B 样条曲面

由前面分析，已知三次 B 样条曲线的基函数 $X=[u^3\quad u^2\quad u\quad 1]\times M_s$，代入式（9.5-23）得双三次 B 样条曲面方程：

$$P(u,v)=[u^3\quad u^2\quad u\quad 1]\,M_s Q_{ij} M_s^T\,[v^3\quad v^2\quad v\quad 1]^T \tag{9.5-26}$$

式中系数矩阵

$$M_s=\frac{1}{6}\begin{bmatrix}-1 & 3 & -3 & 1\\ 3 & -6 & 3 & 0\\ -3 & 0 & 3 & 0\\ 1 & 4 & 1 & 0\end{bmatrix}$$

几何矩阵 Q_{ij}（$i,j=0,1,2,3$）是空间的 16 个控制点，这些控制点逼近 B 样条曲面，但都不经过 B 样条曲面，如图 9.5-37 所示。

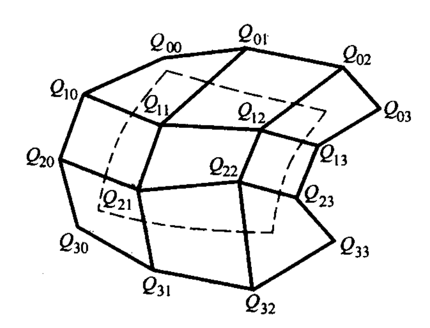


图 9.5-37　B 样条曲面

5.2.5 NURBS 曲面

与 NURBS 曲线的定义类似，给定一组 $(m+1)\times(n+1)$ 的网格控制点 P_{ij}（$i=0,\cdots,m$，$j=0,\cdots,n$）以及各网格控制点的权值 W_{ij}（$i=0,\cdots,m$，$j=0,\cdots,n$），则其确定的 NURBS 曲面的表达式为

$$S(u,v)=\frac{\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}N_{i,k}(u)N_{j,l}(v)W_{ij}P_{ij}}{\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}N_{i,k}(u)N_{j,l}(v)W_{ij}} \tag{9.5-27}$$

式中　$N_{i,k}(u)$——NURBS 曲面的 u 参数方向的 B 样条基函数；

$N_{j,l}(v)$——NURBS 曲面的 v 参数方向的 B 样条基函数；

k,l——B 样条基函数的阶数，其基函数的定义与 NURBS 曲线中完全相同。

$N_{i,k}(u)$ 的结点矢量为：$[x_0\quad x_1\quad\cdots\quad x_p]$；$N_{j,l}(v)$ 的结点矢量为：$[y_0\quad y_1\quad\cdots\quad y_q]$。注意下面几个条件必须满足：

$$x_{i+l}\geqslant x_i,\quad y_{j+l}\geqslant y_j,\quad p=m+k+1,\quad q=n+l+1$$

由于 NUBRS 曲面的定义方法完全类似于 NUBRS 曲线，故计算方法也完全相似。不仅如此，NUBRS 曲线的许多重要特性也与 NUBRS 曲面相同，故在此不再重复。

5.2.6 曲面的反求、拼接和互化

（1）反求

自由曲面在计算机内部存储的是控制点，但在实际工程中，往往先经测绘得到曲面的型值点，然后再由型值点反求出控制点。由于曲面是由空间点经过两次调配得到的，因而曲面的控制点的反求需要“两次反求过程”。第一次反求过程为：将一个参数方向（如 u 方向）上的型值点依次按曲线反求出一系列点；第二次反求过程为：沿另一个参数方向（如 v 方向），将第一次反求得到的点再按曲线算出另一系列点，第二次反求得到的点即为曲面的控制点。

（2）拼接

以双三次自由曲面为例，相邻两片曲面光滑拼接的条件为：

1）对 Coons 曲面，两张三次 Coons 曲面片共边界且在相邻两角点处的坐标、u 向切矢、v 向切矢、扭矢分别相等；

2）对 Beizer 曲面，两张双三次 Bezier 曲面片在边界处的相邻的控制网格共边且在同一平面上；

3）对 B 样条曲面，由于每（4×4）即 16 个几何条件定义一片双三次曲面，如果定义 B 样条曲面的几何矩阵 Q 有 M 行 N 列（$M\geqslant4$，$N\geqslant4$），则可以定义 $(M-3)\times(N-3)$ 个曲面片。与三次 B 样条曲线的连续性相似，只要（4×4）的子矩阵在 Q 矩阵中是依次向右或依次向下移动的，就能自动保证左右相邻的曲面片或上下相邻的曲面片二阶连续。可见，B 样条曲面的连续性条件十分简单，这是 B 样条曲面得到广泛应用的原因之一。

（3）互化

双三次 Coons 曲面、双三次 Beizer 曲面、双三次 B 样条曲面之间可以相互转化。根据式（9.5-24）、式（9.5-25）和式（9.5-26），这三种曲面的方程可以分别表示成：

$$P(u,v)=UM_cQ_cM_c^TV^T \tag{9.5-28}$$

$$P(u,v)=UM_BQ_BM_B^TV^T \tag{9.5-29}$$

$$P(u,v)=UM_sQ_sM_s^TV^T \tag{9.5-30}$$

上述三个方程参数矩阵 $U=[u^3\quad u^2\quad u\quad 1]$ 和 $V=[v^3\quad v^2\quad v\quad 1]$ 都是相同的，只是代数矩阵与几何矩阵不同，但如果它们表示同一张曲面，显然有



$$M_c Q_c M_c^T = M_B Q_B M_B^T = M_s Q_s M_s^T \qquad (9.5\text{-}31)$$

式（9.5-31）描述的就是三种曲面之间的相互关系。例如，由式（9.5-31）可以得到下列两个关系式：

$$Q_B = M_B^{-1} M_c Q_c M_c^T \left[M_B^T \right]^{-1} \qquad (9.5\text{-}32)$$

$$Q_C = M_C^{-1} M_B Q_B M_B^T \left[M_C^T \right]^{-1} \qquad (9.5\text{-}33)$$

式（9.5-32）描述的是将 Coons 曲面转化成 Bezier 曲面表示。式（9.5-33）描述的则是将 Bezier 曲面转化成 Coons 曲面表示。其余曲面间的互化关系类推。

编写：李志刚（华中科技大学）

第6章　产品数据管理技术

1　产品数据管理技术概述

1.1　PDM技术的产生

自20世纪60年代起，制造业开始在产品设计和生产过程中使用CAD、CAM和CAPP技术。企业中各类人员可以不用通过传统的设计图样交流，无需人工查阅企业的各种技术文档及各种技术文献和手册。由于计算机代替人工，缩短了设计时间，提高了设计效率。20世纪80年代初，很多已经广泛开展计算机工程应用的企业发现，企业的发展正受到以纸质文件为基础的数据系统的严重阻碍。这主要表现在：

1）信息共享程度低。企业的计算机辅助工具都是一些离散孤立的系统，由这些互不兼容的软件产生的数据不能统一由一个企业级的计算机软件系统来管理，因而无法在设计、工艺、制造以及管理部门之间有效地实现信息共享与传递。

2）信息传递速度慢。大部分企业的信息传递主要是通过书面文件、报表及电话联络方式，无法及时收集工艺和制造过程中的反馈信息，不能实时反映设计过程中的变化，也不能随时跟踪整个产品的设计和制造的进展情况。

3）设计重用性差。虽然企业采用计算机辅助工具在一定程度上实现了产品设计开发的计算机化，但是有关产品的其他技术资料依然采用手工管理的方式。另外，由于CAD/CAM技术推广应用，各种格式的图形、数据、文本等文件还是沿用过去对纸质文件的管理方法，对文件缺乏有效的版本管理，造成不必要的重复设计。由于缺少迅速有效的产品数据的检索手段，也造成设计的重用性差。

4）应用集成系统效率不高。几乎任何两个不同的应用软件都不能直接分享或交换数据信息。在企业中设计、管理工程技术人员大量的时间用于开会、讨论、等待或处理各种信息。

据英国的调查，由于设计制造缺乏产品数据的统一管理，导致产品工时增加20%，成本上升10%。在这种情况下，许多企业已经意识到实现信息的有序管理将成为它们在未来的竞争中保持领先地位的关键因素。

产品数据管理（PDM，Product Data Management）正是在这一背景下产生的一项用于数据管理的新技术。PDM把数据库的数据管理能力、网络的通信能力、文件系统的管理能力以及自身的数据控制能力结合在一起，通过有效的管理和控制所有与产品相关的信息，可以满足企业对信息管理的较高要求。它可有力地促进新产品的设计与开发，缩短产品上市的时间，增强企业的竞争力。

1.2　PDM的定义

PDM技术最早出现于20世纪80年代初期，目的是为了解决大量工程图样、技术文档以及CAD文件的计算机管理问题。由于PDM技术与应用范围发展很快，人们对它还没有一个统一的认识。综合PDM技术的应用范围和发展，可将其定义为：PDM是以软件为基础，实现对所有与产品有关的数据、过程和资源的集成管理技术。数据包括任何与产品相关的数据，如CAD/CAM/CAE文件、工程规范、扫描图像、电子文档、产品结构、产品定单、供应商状况、物料清单（BOM）、产品配置、审批信息等；与产品相关的过程包括工程流程、加工工序、审批/发放流程、工程更改过程等；资源包括人、资金和设备等。

从这个定义可以看到，PDM系统可帮助管理人员、工程师和其他人员追踪在设计、制造、销售，以及售后服务与维修过程中所需要的大量信息。它提供了产品全生命周期的信息管理，并可在企业范围内为产品设计与制造建立一个并行化的协同工作环境，可以在产品设计、生产、市场营销等方面提供支持，提高工作人员工作效率和过程运行的效率。

1.3　PDM系统的体系结构

PDM系统的体系结构可分为四层，即用户界面层、功能模块层、框架核心层和系统支撑层（图9.6-1）。

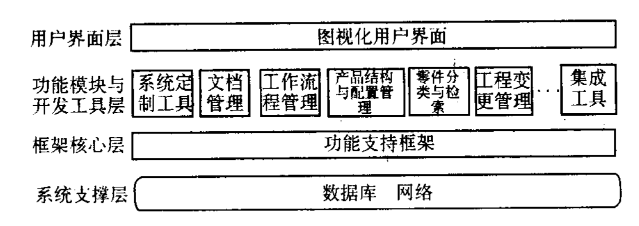


图9.6-1　PDM系统的体系结构

1）用户界面层。为用户提供各种图示化的交互操作界面，包括各种菜单、对话框，以及支持命令操作的输入和输出。通过用户界面，用户可完成PDM系统中数据对象的操作与管理。

2）功能模块层。为用户提供完成产品数据管理的各种功能模块，其主要功能包括文档管理、工作流程管理、零件分类与检索、工程变更管理、产品结构与配置管理和集成工具等。

3）框架核心层。提供实现PDM各种功能的核心结构，完成对异构操作系统、网络、数据库的屏蔽，实现用户对各种数据的透明化操作、应用的透明化调用和过程的透明化管理等。

4）系统支撑层。系统支撑主要指用于PDM系统底层数据管理的关系数据库系统，它提供了PDM系统数据操作的功能。作为PDM技术最新的发展，它与网络系统联在一起，因此网络的通信能力也是PDM系统的支撑技术之一。

2　PDM系统的功能

PDM技术用于管理和控制所有与产品有关的数据和相关过程，可以作为制造业信息化集成平台。PDM软件产品种类繁多，不同软件商提供的PDM软件产品，在功能上有一定的差异，而其应包含的功能也众说不一。一般来讲，PDM的功能有两种划分方法，一是将其分为应用功能和系统功能两个层次。应用功能是PDM系统中直接使用的用户化功能，包括文档管理、过程和工作流管理、产品结构与配置管理、零部件分类库管理和工程变更管理。系统功能是指为实现应用功能所提供的底层支持功能，包括分布式通信功能、数据转换功能、图像服务功能（扫描与图形处理、圈阅与注释）和系统集成工具等。另一种是按软件功能模块划分，可划分为电子仓库和文档管理、工作流程与过程管理、产品结构与配置管理、零件分类管理、工程变更管理、项目管理、电子协作、集成工具、浏览和圈阅等。这里，将介绍PDM系统的主要功能。



2.1 数据与文档管理

数据与文档管理的核心就是具有安全机制的电子仓库。这是 PDM 最基本的功能，是 PDM 实现管理的基础。电子仓库是在 PDM 系统中实现某种特定数据存储机制的元数据（管理数据的数据）库及其管理系统。它保存了与产品有关的物理数据和文件，以及指向这些物理数据和文件的指针，指针指向具体的文件系统与目录。电子仓库分三种类型，即集中式、分布式和虚拟式，如图 9.6-2 所示。第一种为集中式存储模式，各种物理数据和文件位于同一台计算机上，数据的唯一性自然得到保证，安全性好，但由于用户从远程登录来得到数据，访问速度慢。第二种为分布式存储模式，这种模式中，同一个电子仓库可以对应多个分布在不同的计算机上的文件系统和目录；同一个物理数据库可以对应多个不同的电子仓库，并且它们之间的元数据共享。这样，在分布式环境中电子仓库与电子仓库之间，以及电子仓库与用户之间能直接进行数据操作，并且这种操作是透明的，用户无需进行远程登录。这种方式，局部速度快，但域间仍然较慢。第三种是具有域间复制文件功能的虚拟电子仓库，虚拟式电子仓库在分布式电子仓库的基础上，不仅做到文件系统的分布式存储，而且做到元数据库与物理数据库的分布式存储，即只有一个包括所有数据的虚拟电子仓库。

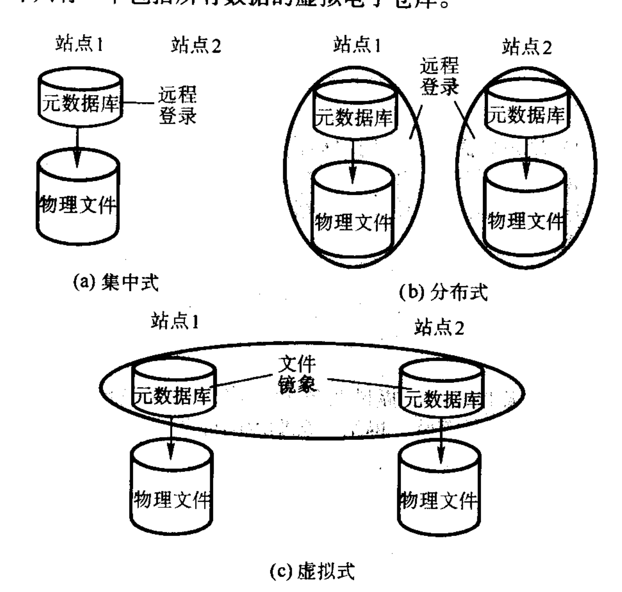


图 9.6-2 电子仓库的存储模式

数据与文档管理的主要功能有文档的归档、检索、处理、安全控制和版本管理。

(1) 文档的归档管理

归档管理是对文档进出电子仓库进行管理，能按照文档的不同类型，进行文档的分类查询、分类归档，使各类文档在系统中能进行有序管理，一方面缩短了信息查询时间，另一方面使得与产品有关的信息的描述更直观、更清晰。归档管理主要包括归档、提档（出库）以及对这些操作的安全性管理。归档包括入库及编辑（如复制、删除、转库等）两部分。

(2) 文档检索/导航

这是 PDM 系统为用户提供的快速查询手段之一。用户可通过图形界面等导航方式直接查找文档，也可通过指定某些属性（如文档的类型、名称、状态、所属项目、设计者姓名等）等检索方式来快速查找。与人工检索相比，大大减轻了检索工作量，提高了查询速度和工作效率。PDM 系统还提供一种与产品结构直接相关的文档管理方式，使用户可直观、全面地了解产品及零部件的各种数据和文档。

(3) 文档的处理

主要的功能有：查看与批注、扫描与绘图及文件格式转换等。在 PDM 系统中，一般应支持对多种格式文件的浏览，如 PDES/STEP、IGES、DXF、DWG、TIFF、PostScript、HP/GL 等文件格式，可支持对某些 CAD 系统原始文件的查询，并允许用户在这些文件上作批注，如注释或以图形方式圈点等。

(4) 文档的版本管理

在产品的设计过程中，需要对设计进行反复修改。在这种情况下，如何保证前后数据的一致性是非常重要的问题。通过文档的版本管理，可将文件的每一次变化设置为不同的版本，并建立不同版本之间的对应关系，以保证在特定的时间段对应于特定的数据。若从库中提出文档进行修改，再存入时其版本将自动发生变化。

(5) 文档的安全控制

文档在计算机中存放是否安全，指的是文档是否由于意外事故而丢失，会不会遭到非法的复制、修改和使用，这是文档管理的重要工作。PDM 系统将文档存放于不同的电子仓库中，对不同的用户赋予不同的操作权限，使得他们只能在规定的权限下处理规定范围的文档，保证各类文档不被非法盗用和修改，从而保证文档在计算机中的安全性。此外，为了防止意外事故造成不必要的损失，系统还提供定期数据备份的功能。

2.2 过程与工作流程管理

过程是指数据对象在其全生命周期中从一种状态变到另一种状态时应进行的操作和处理。工作流程是对某些类或某些数据对象的多个过程的有序组合。工作流程与过程管理是 PDM 系统中重要的基本功能之一，它用于定义和控制工作流程的运行和维护，控制工作状态以及对工作历史过程进行记载，并使产品数据流向与其相关的过程有机地结合起来。它使在一个产品全生命周期中参与“加工产品”的人员都可以在正确的时间、以正确的方式得到正确的任务，从而保证企业内部工作有计划地进行，有助于优化产品的开发过程。

过程与工作流程管理的主要功能有：定义并建立工作流程；运行并控制工作流程；察看流程中文档的状态等。

(1) 定义并建立工作流程

PDM 系统用于管理产品数据，因此工作流程主要与产品设计与开发有关。产品设计是一个不断创建和对产品数据反复更改的过程，对于每一种零部件都伴随着创建、修改、查询、检查和审批等工作，在此期间可能需要反复多次，而且每种零部件的设计将会采用不同的技术和不同类型的数据。同时，每一个文件的变化，都有可能对其他相关文件造成潜在的影响，所以需要不断地进行检查、修正、重新提交和再检查。一个工作流程是多个过程的有序组合，过程之间有先后顺序关系，也有并行关系。定义工作流程就是要定义完成一个特定工作所经过的过程和过程之间的关系，以及每一个过程开始和结束时数据的变化与流向。在 PDM 系统中，一般是用图示化的工作流程设计工具来完成工作流程的定义的。

(2) 运行并控制工作流程

工作流程的运行与控制可以将每个参与人员的任务放到个人的工作任务列表单中，每个参与人员从计算机中可查看到自己的工作任务，并在流程的规定下并行地工作。PDM 系统一般提供触发、警告、提醒机制，以提醒参与人员目前的工作任务，并按规定完成工作任务。系统一般还具有电子邮件接口，实现系统用户之间的通信和消息的发放。

(3) 察看流程中文档的状态



在工作流程运行的过程中，任何授权的用户均能看到流程执行的情况、流程中文档的确切位置、浏览过程的历史以及执行的结果和注释等。项目管理员可以根据过程的完成情况检查各个人员工作时间是否超期，以便作出相应决策。

PDM 系统不只是保存项目当前状态的数据库的记录，它还应该记录项目经历过的状态，这使得 PDM 系统成为审查跟踪数据潜在的、有价值的资料源。

2.3　产品结构与配置管理

产品结构与配置管理作为产品数据组织与管理的一种形式，以电子仓库为底层支持，以材料明细表（BOM）为其组织核心，把定义产品的所有工程数据和文档联系起来，实现产品数据的组织、管理与控制，并在一定目标或规则约束下，向用户或应用系统提供产品结构的不同视图和描述，如设计视图、装配视图、制造视图、计划视图等。

产品结构与配置管理包括产品结构管理与产品配置管理两部分。产品结构管理以产品结构树表示产品的结构，并通过建立产品结构与其他产品信息（如工程手册、设计文档、更改单等）之间的关系对产品结构进行管理，它主要包括对产品本身装配结构的管理和对其相关支持数据的管理。将产品结构中的零部件按照一定的条件进行重新编排，得到特定条件下的产品结构，称为配置，其中条件称为配置条件。用不同的配置条件形成产品结构的不同配置，称为产品结构的配置管理。通过产品结构配置，可以实现产品结构的多视图管理。

PDM 系统提供给用户的产品结构与配置管理基本功能主要有：

1）BOM 创建与修改；
2）版本生成与修订控制管理；
3）多视图 BOM 建模与管理；
4）支持与 MRPⅡ/ERP 系统集成；
5）规则驱动的配置管理；
6）支持对产品文档的查询。

2.4　零部件分类库管理

PDM 中产品结构管理是以某个产品或部件的构成考察零部件在其中的作用及其具有的属性，而一个零件或部件往往在多处使用。如何以零件为中心，组织有关产品信息，使之便于检索、便于借用和信息的再利用，这就是零件分类管理的目标。

零件的分类管理就是按一定的分类方法（如成组技术），建立标准件、常用件的分类库，以利于设计再利用。零部件分类库管理的主要功能有：

1）零部件库接口；
2）电子文档属性编码；
3）基于设计内容的再利用。

2.5　项目管理

项目管理是一种为了在确定的时间内，完成一个特定任务，通过一定的方式合理地组织有关人员，并有效地管理项目中的所有资源（人员、设备等）与数据，控制项目进度的系统管理方法。项目管理包括两个方面的内容，一是项目组织，即根据一个项目的内容，合理地组织项目中的人员和资源。二是项目控制，即通过跟踪项目进度，掌握项目的工作现状，以便进行适当的资源调度和进度调整。

目前 PDM 系统大多没有提供对项目及其进度进行自动监控的工具，还需要项目负责人通过察看项目中文档的状态，实施对项目的控制。

2.6　其他功能

PDM 系统除了上述的应用功能外，还需要提供实现这些应用功能所需要的底层支持功能。这些功能包括：

1）分布式通信功能。PDM 系统是在一个分布式环境下运行的，PDM 系统的用户需要从网上得到所要的产品数据和其他消息。为了满足这一要求，PDM 系统提供的功能包括网上文件传输和电子协作功能，其中电子协作功能可包括电子邮件、网上会议、公告牌和讨论区等。

2）扫描与图形处理。企业内部存在大量的图样和其他非数字化信息，通过扫描输入工具可以将它们转换成数字化的图像文件，并把它们用 PDM 系统统一管理，为企业原有非数字化文件与图样的计算机管理提供支持。对于图像文件，还可以用图形或图像编辑的有关工具，实现文档的浏览、放大、移动、拷贝和删除等操作。

3）圈阅与注释功能。这一功能是在浏览的基础上，在文档上加圈阅和注释，同时保持原有文档不被破坏，而有关圈阅和注释的内容又能被其他人员查看。

3　PDM 系统的实施

PDM 技术的应用与实施是企业信息化的必由之路，PDM 技术要在企业中真正发挥作用，重点在实施。由于每个企业具有不同的企业文化和管理模式，故而在企业中实施 PDM 必须结合每个企业的具体情况进行。PDM 的实施没有一个现成的解决方案，实施过程本身就是为企业制定解决方案的过程。而且，实施 PDM 涉及到企业不同的部门甚至不同的企业之间的协作，是一个较为复杂的系统工程，必须有正确的实施方法和步骤。下面将讨论 PDM 系统实施的内容、步骤和信息建模等问题。

3.1　PDM 实施的内容

根据 PDM 技术在企业中的应用实施范围，目前有两种模式。一是部门级 PDM，例如所管理的数据仅限于工程设计和工艺设计部门。另一种是企业级 PDM，它所管理的产品信息能覆盖到整个企业，包括产品的市场调查、需求分析、研究开发、产品设计、工程制造、销售、服务和维护等生命周期中的所有信息。这两种模式虽然应用范围不一样，但基本内容都包括：

1）计算机系统与网络的建设。PDM 系统是建立在信息的计算机化基础上的，计算机与网络系统是 PDM 系统实施的前提条件。

2）PDM 系统的定制。针对企业和产品的具体情况，为用户配置符合企业使用习惯的相应工作环境，并根据企业的组织模式，设置人员组织、角色、权限规定等。

3）文档管理的实现。要对企业各种产品对象分类定义，建立属性表、版本模型以及对象之间的关联等。并通过数据库系统实现文档的管理。

4）产品结构树。建立层次化的企业产品结构树模型，以及对产品结构树的管理。

5）产品配置管理的实现。根据企业不同应用阶段产品明细表要求的具体情况，确定产品配置的条件，实现产品的不同配置，即实现多视图明细表的建立与管理。

6）工作流程的定义与实现。分析企业现有的作业流程，进行重组和优化，确定产品开发设计工作流程和设计更改流程。并在 PDM 中实现相应的流程定义和控制。

7）系统的集成。实现 PDM 系统与 CAD/CAPP/CAM 系统、MRPII 或 MIS 系统、以及用户开发的应用系统的集成。



3.2 PDM 实施的基本步骤

PDM 系统的实施可按下面步骤进行。

1）人员组织。PDM 在实施中，人员是关键。在开始实施 PDM 时，首先要成立一个由企业负责人亲自挂帅，各级业务骨干及计算机支持人员所组成的 PDM 项目组，负责 PDM 的实施与应用推广。

2）网络及产品数据库的建设。建立 PDM 系统运行的硬件和网络环境，对现有产品数据建立数据库管理的机制。

3）软件选型及人员培训。根据企业 PDM 实施的目标及功能需求、预算和投资等条件，选择适当的 PDM 软件，并进行相关人员的培训。

4）数据收集及分析。这一阶段实际上就是系统的需求分析。要对企业的人员、产品数据、工作流程和资源进行详细的调查与分析。其中，人员是指人员的组织结构、权限和任务等；数据是指要定义企业中需要 PDM 系统管理的数据对象的属性和数据对象之间的关系；工作流程是指现在的设计、更改、审批等活动的过程，以及活动所涉及的数据、人员配备等，现行工作流程一般是以图样信息为基础的，如果实现信息的计算机化后肯定有不合适的地方，要进行分析，建立新的适合计算机管理的流程；资源是指现有的硬件、软件和通信软件和设备等。除了以上内容，还要对现有的应用系统进行调查与分析，如 MRPⅡ、CAD/CAPP/CAM 系统等，确定它们是否能与 PDM 系统集成，或者是否要购买新的应用系统，以便能顺利地与 PDM 系统集成。

5）信息建模。在了解 PDM 的工作环境和基本功能的基础上，根据所收集的数据进行信息建模。一般需要建立六个模型，即人员管理模型、产品对象数据模型、产品结构管理模型、产品配置模型、过程管理模型和信息集成模型。

6）系统定制与集成开发。这一工作要由项目组与合作伙伴共同完成，即利用 PDM 提供的定制工具和开发工具，根据系统的需求和信息模型，对选定的 PDM 系统进行二次开发。包括设计系统的用户界面，在系统中定义并实现人员模型、产品对象模型、产品结构管理模型、产品配置模型和工作流程模型，完成与 CAD/CAPP/CAM 系统和 MRPⅡ 等应用软件的集成。

7）系统运行与调整。这一阶段完成系统的运行与测试，对运行中发现的问题及时进行修改，有时还需要重新调整原设计方案，或根据企业的需求，增加新内容。为了系统在企业中全面应用，要对有关的人员进行全面的培训，保证系统的正确使用，并通过使用及时发现并解决问题，使系统不断改进和完善。

PDM 系统的实施，除了要求管理大量的与产品有关的数据文档外，也是对企业传统管理模式的一个挑战。如果企业全面实施 PDM 有困难，也可以采取总体规划，重点突破的实施策略，可以先在一个部门或选择一个产品型号实施 PDM，对 PDM 实施方案进行不断的改进与完善，积累 PDM 技术的应用经验，以便进一步在整个企业中全面实施 PDM 技术。

3.3 PDM 的信息建模

为了成功地在企业中实施 PDM，关键在于建立符合企业情况的信息模型，包括人员模型、产品模型和工作流程模型。

（1）人员模型

人员模型也称为组织－角色－权限模型，它规定了人员的组织结构、角色、操作权限，它是 PDM 系统实施的基础。

人员的组织结构模型以树状图结构表示人员的所在单位和隶属关系，如生产部、技术部、销售部等。图 9.6-3 所示为一个模具公司技术部的人员组织。

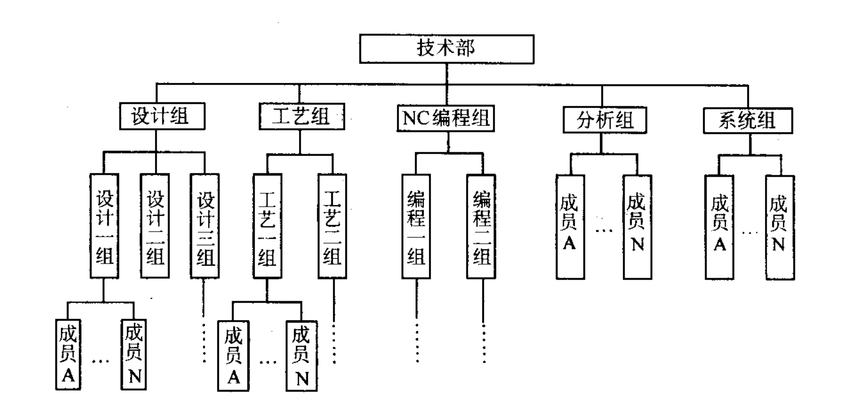


图 9.6-3 人员组织结构图

角色是指人员在工作中所承担的岗位责任。如技术部人员有设计员、工艺员和计算机系统管理员等。以一个模具公司技术部为例，其人员的角色如图 9.6-4 所示。

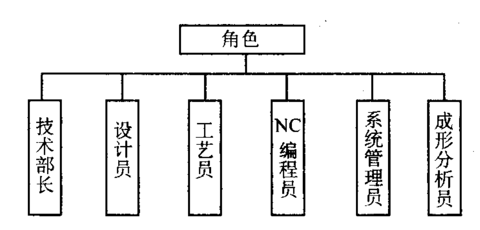


图 9.6-4 技术部的角色

人员模型中的权限设置包括两个方面的内容，一是权限作用的对象，如是某类产品还是某个部件或零件，是设计模型还是工艺工件等。另一方面是对文档的读、写、删除、修改和拷贝的权限。需要注意的是，权限不仅与受控对象有关，还与受控对象的状态有关。如一个设计文档经过审批发放后，原设计人员所有的修改权限不再有效，新的权限是只读与拷贝。

为了减少复杂的设置，在 PDM 系统中可以先设定基本的权限类，也就是受控对象、角色和权限的关联表，以后要设置权限时只需设定相应的权限类即可。表 9.6-1 是一个基本的权限类的定义。

表 9.6-1　基本的权限类定义

权限类名	工作组	角色	受控对象	读	写	删除	修改	拷贝	……
设计类 1	设计组 N	设计员	设计模型	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	……
设计类 2	同设计组	设计员	设计模型	Yes	No	No	No	Yes	……
设计类 3	其他设计组	设计员	设计模型	Yes	No	No	No	No	……
工艺类	工艺组	工艺员	工艺文件	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	……
访问类	其他组	其他组员							……
管理类	系统管理组	系统管理员							……
……	……	……		……	……	……	……	……	……

将以上的人员组织结构、角色和权限设计成一个关联表，就可形成人员管理模型，如表 9.6-2 所示。

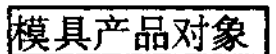
表 9.6-2　人员管理模型

用户登录名	姓名	工作组	角色	权限类名
ABC	×××	设计组	设计员	设计类 1
BBB	×××	工艺组	工艺员	工艺类
CCC	×××	系统组	系统管理员	管理类

(2) 产品模型

产品模型描述产品结构、设计信息及相关文档，它由产品数据模型、产品结构与配置模型、版本模型等组成，是产品信息的综合体现。

每个产品对象的具体内容用属性来描述，属性描述了对象的不同方面的信息，以便按不同规则进行分类和查找有关对象。不同类型的对象有不同的属性描述内容。所有对象进入 PDM 系统时均要对各自对应的属性表赋值。在 PDM 系统中，也可以查看属性的值，以便随时掌握对象的情况。一般每个对象均有对象编号、对象名称、项目编号、版本号、对象类型和描述等信息。模具产品对象的属性模型如图 9.6-5 所示。



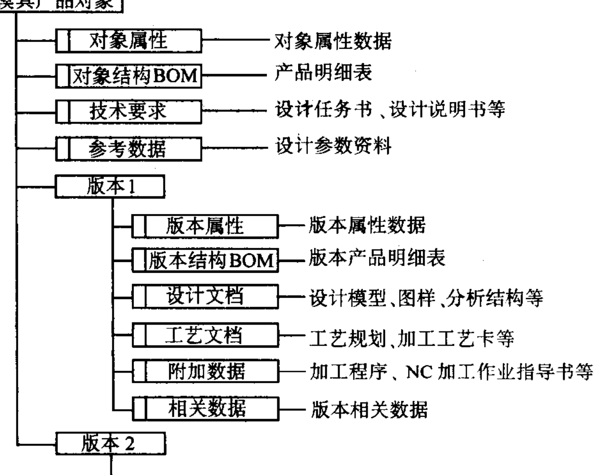


图 9.6-5　模具产品对象的属性模型

PDM 系统中，版本是一个较为重要的概念，它是产品在其生命周期中状态的标志。一个企业要面向市场就必须不断地推出新的产品和改进原有的老产品，与改进有关的项目内容以及数据结构上的更改是造成 PDM 版本变化的主要原因。每个产品对象至少有一个版本。每个对象版本也有对象编号、对象名称、项目编号、版本号、对象类型和描述等信息。

产品结构是由产品对象间的关系组成的。通常是以产品结构树的方式反映产品零件之间的层次与隶属关系。模具是由零件组成的一个装配体，模具的产品结构可以用其装配树来表示，如图 9.6-6 所示。

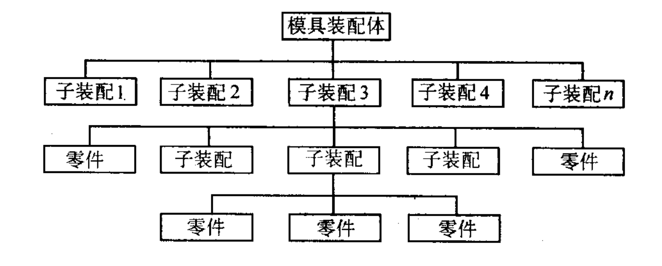


图 9.6-6　模具产品结构

在整个产品生命周期内，为了从不同的应用角度对产品观察，需要建立产品结构的多视图 BOM，这部分工作由产品结构配置来实现。在冲压生产中，由于成形一个零件的模具有时由多套组成，所以可以按产品零件实现模具产品结构的配置。另外模具和一般的机械产品不同，它是根据定单加工的，一个定单有一定的时间和制造上的要求，可以将其组成一个项目，此时产品结构配置就可以按项目实现结构配置。

(3) 工作流程模型

PDM 强调过程集成，主要体现在用过程来组织人员、设备资源、应用工具，并对模具设计数据的存储、提交、发布进行控制，做到所有参与人员在适当的时候在适当的地点得到所需的数据。因此，建立工作流程模型是 PDM 系统实施的重要内容。图 9.6-7 所示，是典型的模具设计流程。

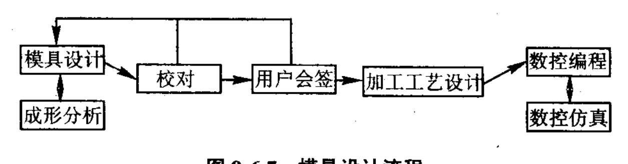
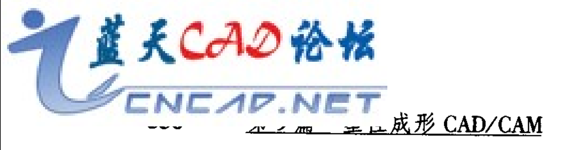


图 9.6-7　模具设计流程

3.4　成功实施 PDM 应注意的几个问题

(1) 人员组织

在 PDM 实施中，人的作用是关键，因此必须组成一个有效的项目实施队伍。由于 PDM 系统的实施，需要对企业传统的管理模式进行改革。因此，必须由企业负责人亲自挂帅，各部门主管参与，只有这样才能保证适应 PDM 技术的新型管理模式在企业中贯彻执行。



(2) PDM 软件选型

PDM 软件只是为企业管理产品数据提供管理框架，而企业的具体情况是千差万别的，这就决定了不是任何一个 PDM 软件拿来就可以使用。因此选择一个适当的 PDM 软件是非常重要的。选择一个 PDM 软件，同时就选择了一个 PDM 实施的合作伙伴。因此，选择 PDM 软件，除了要满足功能需求外，PDM 软件商的后续支持与服务是软件选型时需要考虑的一个重要问题。PDM 软件选型一般要考察以下的内容：软件的功能是否能满足企业的需求、系统开发性与集成能力、技术服务能力、软件价格、有无成功用户、能否汉化等。

(3) 产品设计开发过程的优化

PDM 技术是建立在产品信息数字化的基础上的，它和传统的以图纸为介质的数据管理模式有着本质的区别。因此对于产品设计与设计变更过程必须进行认真地分析，决不能用 PDM 技术支持旧的不合理的流程，否则不能体现 PDM 技术的优越性。

(4) 培训

PDM 的实施一方面要依赖软件商和合作单位的支持，另一方面一定要培养自己的系统管理与维护、应用开发与实施人员。只有企业参与人员掌握了 PDM 技术，才能保证 PDM 系统长期有效地运行，并发挥作用。这就需要对企业人员进行有成效的培训，不同的人员培训的内容应有侧重，其内容主要包括：PDM 技术原理、实施方法、应用开发和软件的操作等。

4 基于 PDM 的系统集成

随着计算机技术的发展和企业信息化不断深入，企业大量使用以计算机为基础的应用软件，如用于设计制造过程的 CAD、CAM、CAPP、CAE、CAQ 等软件，以及用于企业经营管理的管理信息系统（MIS）、制造资源规划（MRPⅡ）、企业资源规划（ERP）等软件。随着计算机应用的深化，企业迫切需要在这些系统共享信息。例如，产品结构信息，它是 CAD 模型中的装配树，CAPP 需要根据装配树进行零件的工艺设计，而它同时又和 MRPⅡ 中的物料清单相对应。PDM 作为 CIMS/CE 应用集成平台的使能技术，能支持异构计算机环境，包括不同的网络与数据库；其次能实现产品数据的统一管理与共享，提供单一的产品数据结构，为应用系统的集成提供了一个有效的途径。

4.1 基于 PDM 实现应用集成的三个层次

通常，PDM 系统与应用系统的集成可分为三个层次，即封装、接口和紧密集成。

(1) 封装

封装通过调用 PDM 系统提供的应用封装工具或应用软件提供的封装工具来实现。一般是通过定义文件类型，以及应用程序的环境变量等条件，而使 PDM 系统能够在需要时自动启动外部应用程序。封装有两方面的内容，一是 PDM 系统能自动识别、存储和管理应用软件产生的文件；另一方面是在 PDM 系统激活该类文件时，可启动相应的应用软件，以便对文件进行编辑和修改。通过应用封装，使应用软件与所产生的文件在 PDM 环境下相互关联起来。

封装实现起来比较简单，但功能也较少，PDM 系统只是将应用软件产生的文件作为一个整体管理起来，而不能处理与管理文件内部的数据。如 CAD 系统产生的产品模型中的特征、约束、装配关系等，用封装的方法在 PDM 系统无法得到与处理。

(2) 接口

接口提供了较为紧密的应用系统集成，是比应用封装更高层次的集成模式。它通过接口程序使得 PDM 系统能得到应用软件产生的文件中的信息，并定义到 PDM 模型中，由 PDM 统一管理；或从 PDM 系统中提取应用软件需要的数据对象，供应用系统使用。例如从 CAD 装配模型中提取产品结构明细表，通过接口程序传输到 PDM，建立 PDM 的产品结构树，或者从 PDM 中的产品结构树中提取最新的产品结构关系，以修改 CAD 中的装配树等。这种集成方式需要了解应用系统的数据结构，也要了解 PDM 系统的组织形式，因此实现起来工作难度比应用封装要大。

(3) 紧密集成

紧密集成具有自动双向交换所有相关信息的能力，包括产品数据、产品结构、装配信息、BOM 表等。应用软件与 PDM 系统不仅可以共享数据，还可以共享操作服务。就数据共享而言，就是在应用系统和 PDM 系统中的一方创建或修改共享数据时，另一方也能进行自动修改，以保证双方数据的一致性。另一方面，要在应用系统中插入 PDM 中有关数据对象编辑和维护功能，在应用系统中编辑某一对象时，在 PDM 系统中也能对该对象进行自动修改。紧密集成的典型应用例子是 CAD/CAM 与 PDM 系统之间产品结构的一致性维护，当应用系统或 PDM 系统的产品结构发生变化时，另一方能自动发生相应改变，从而保证 CAD/CAM 中的装配树、MRPⅡ 中的物料清单和 PDM 中的产品结构树的一致性。

紧密集成是每个实施 PDM 的企业所期盼的目标，但是要真正实现这种集成，要求了解 PDM 与应用系统底层的数据结构，因此很难做到。目前能做到这种集成的是应用软件与 PDM 软件由同一软件厂商提供的情况，例如，UG 公司的 CAD/CAM 软件与它的 PDM 软件 IMAN 就做到了紧密集成。

4.2 模具 CAD/CAPP/CAM 与 PDM 的集成

目前许多模具企业已采用了模具 CAD、CAPP、CAM 技术，并实现了 CAD 与 CAM 和 CAPP 共享数据模型。但随着模具 CAD/CAPP/CAM 技术的应用，每天都产生大量的设计模型和文档，对这些设计文件的管理和快速检索，以及在设计中的重用是企业面临的一个难题，解决这一问题的有效途径是实现模具 CAD/CAPP/CAM 与 PDM 系统的集成。它一方面能管理由模具 CAD/CAPP/CAM 系统产生的数据模型和文档，另一方面还可为 CAD/CAPP/CAM 的集成运行提供支持。图 9.6-8 所示为 PDM 系统与模具 CAD/CAPP/CAM 系统集成的方案。模具 CAD 从 PDM 系统得到设计任务书，调用已有的标准零部件等设计资料，生成模具图和设计模型。模具 CAPP 从 PDM 系统得到模具图和设计模型以及设计资源（设备和材料），生成冲压工艺卡和工装夹具的设计图等。模具 CAM 从 PDM 得到设计模型，生成 NC 代码和数控指导书。由 CAD/CAPP/CAM 所生成的设计模型、设计图和文件由 PDM 文档管理模块管理。模具 CAPP 和模具 CAM 从 PDM 中取得的模具图和设计模型必须是经过审批发放的文档，审批发放过程由流程管理来实现。在模具 CAD 中调用的标准零部件通过 PDM 的零件分类管理模块来实现。产品、模具设计和工艺的修改过程由工程变更模块管理。

最简单的模具 CAD/CAPP/CAM 与 PDM 的集成方式是封装，这种方式实现比较简单，但仅仅能对模具 CAX 的文档实施有效的管理。模具 CAD/CAPP 与 PDM 完整的信息交换必须包括设计模型内部的数据（如特征、参数和装配关系信息）提取与管理，如果要实现这样的目标，就要通过二次开发，设计模具 CAX 与 PDM 的接口程序来实现，这种方式有一定的难度。最理想的方式是统筹考虑模具 CAX 的支撑软件和 PDM 软件的选型，即选择能做到紧密集成的 CAD/CAM 系统与 PDM 系统。当然，这种方式在软件的价格上可能会比较高。至于采用何种集成方式，可以根据企业的实际需





求，综合考虑成本、效益等因素来确定。

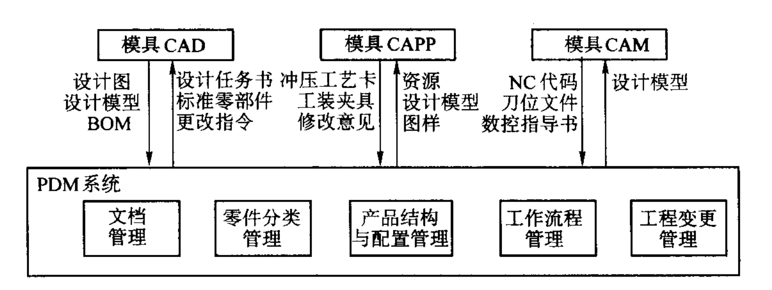


图 9.6-8　模具 CAD/CAPP/CAM 与 PDM 的集成

编写：李志刚（华中科技大学）

第 7 章　优化设计方法

1　概论

产品设计和工艺过程的最优化始终是人们追求的目标。采用传统的方法进行产品和工艺过程设计，不仅难以实现优化设计，而且设计的可靠性差。目前大多数塑性加工 CAD/CAM 系统中使用的设计方法与手工设计时采用的方法基本相同，遇到一些复杂问题，或者存在多种设计方案时，仍需设计人员加以选择和判断。在塑性加工工艺和工艺装备的设计过程中实现最优化设计仍是人们大力发展的设计方法。

各种设计问题的具体要求和约束条件千变万化，但是为了实现优化设计，通常都是对一组设计参数进行优选，使其达到最佳值，并且满足设定的约束条件。因此，这样的问题在数学上可以表述为在以等式或不等式表示的约束条件下求多变量函数的极小值或极大值，即求

$$\left.\begin{array}{l}\min f(\boldsymbol{x}) \quad \boldsymbol{x}=[x_1,x_2,\cdots,x_n]^{\mathrm{T}}\in R^n \\ \text{受约束于}\ g_u(\boldsymbol{x})\leqslant 0\ \text{或}\ g_u(\boldsymbol{x})\geqslant 0 \quad u=1,2,\cdots,m \\ h_v(\boldsymbol{x})=0 \quad v=1,2,\cdots,p<n\end{array}\right\} \tag{9.7-1}$$

1.1　设计变量

在设计中，不同的设计方案，通常是以一组取值不同的参数来表示。这些参数可以是表示零件形状、大小、位置等的几何量，也可以是表示质量、速度、加速度、力、力矩等的物理量。在构成一个设计方案的全部参数中，可能有一部分参数根据实际情况预先确定了数值，它们在优化设计过程中始终保持不变，这样的参数称为给定参数。另一部分参数则是需要优选的参数，它们的数值在优化设计过程中是变化的，这类参数称为设计变量。

如果一个优化设计问题有 n 个设计变量，而每个设计变量用 x_i（$i=1,2,\cdots,n$）表示，则可以把 n 个设计变量按一定的次序排列起来组成一个列阵或行阵的转置，即写成

$$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\\vdots\\\vdots\\x_n\end{bmatrix}=[x_1,\ x_2,\ \cdots,\ x_n]^{\mathrm{T}} \tag{9.7-2}$$

式中 $\boldsymbol{x}$ 为 n 维欧氏空间的一个向量，设计变量 x_1、x_2、…、x_n 为向量 $\boldsymbol{x}$ 的 n 个分量。在优化设计中把这个 n 维的欧氏实空间称为设计空间，用 R^n 表示，它是以设计变量 x_1，x_2，…，x_n 为坐标轴的 n 维空间。设计空间包含了该项设计所有可能的设计方案，且每一个设计方案就对应着设计空间的一个设计向量或者说一个设计点 $\boldsymbol{x}$。例如，$n=2$，即只有两个设计变量，其设计空间就是由 x_1 和 x_2 为坐标轴所构成的平面。如图 9.7-1a 所示。由原点 o 出发向 $\boldsymbol{x}^{(k)}$ 点作一个向量，它即代表了设计空间的第 k 个设计方案。这个方案可以由给定的 $x_1^{(k)}$ 和 $x_2^{(k)}$ 值来确定，因此，第 k 个设计方案可以表示成

$$\boldsymbol{x}^{(k)}=\begin{bmatrix}x_1^{(k)}\\x_2^{(k)}\end{bmatrix}=[x_1^{(k)},x_2^{(k)}]^{\mathrm{T}}$$

当 $n=3$ 时，即由三个设计变量 x_1、x_2、x_3 组成一个三维设计空间，如图 9.7-1b 所示。其任一设计方案表示为

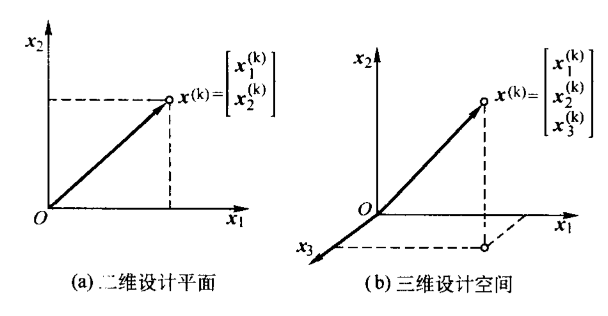


图 9.7-1　设计空间

$$\boldsymbol{x}^{(k)}=\begin{bmatrix}x_1^{(k)}\\x_2^{(k)}\\x_3^{(k)}\end{bmatrix}=[x_1^{(k)},\ x_2^{(k)},\ x_3^{(k)}]^{\mathrm{T}}$$

设计变量的数目越多，其设计空间的维数越高，能够组成的设计方案的数量也就越多，因而设计的自由度也就越大，从而也就增加了问题的复杂程度。一般来说，优化设计过程的计算量是随设计变量数目的增多而增加的。因此，对于一个优化设计问题来说，应该恰当地确定设计变量的数目。并且原则上讲，应尽量减少设计变量的数目，即尽可能把那些对设计指标影响不大的参数取作给定参数，只保留那些比较活跃的对设计指标影响显著的参数作为设计变量，这样可以使优化设计的数学模型得到简化。

1.2　目标函数

在优化设计中，用目标函数值的大小来衡量设计方案的优劣的，目标函数的一般表示式为

$$f(\boldsymbol{x})=f(x_1,x_2,\cdots,x_n) \tag{9.7-3}$$

优化设计的目的就是确定设计变量，使目标函数值达最佳值。由于采用目标函数值的大小来衡量设计方案优劣，故最佳值就是指极大值或极小值。由于求目标函数 $f(\boldsymbol{x})$ 的极大化等价于求目标函数 $f(\boldsymbol{x})$ 的极小化，因此为了统一，通常最优化就是指极小化，即 $f(\boldsymbol{x})\rightarrow\min$。

在工程设计问题中，设计所追求的目标可以是各式各样的，当目标函数只包含一项设计指标极小化时，称它为单目标设计问题，有时也可能要求多项设计指标达到极小化，这就是所谓多目标设计问题。单目标优化设计问题，由于指标单一，易于衡量设计方案的优劣，求解过程比较简单明确。多目标问题则比较复杂，这是因为具有两个以上的目标函数，往往它们并不是依赖完全不同的设计变量，而且不存在各自独立的约束条件。

由于目标函数是设计变量的函数，故给定一组设计变量值就相应地有一个目标函数值，并在设计空间对应有一个设计点。具有相同函数值的点集在设计空间内形成一个曲面或曲线，我们称其为目标函数的等值面或等值线。在具有 n 个设计变量的 n 元目标函数中，相同目标函数值的点集在 n 维设计空间是个等值超曲面，对于两个设计变量的二元目标函数则是一条等值线。

1.3　约束条件

优化设计不仅要使所选择方案的设计指标达到最佳值，同时还必须满足一些附加的设计条件，这些附加的设计条件



是对设计变量取值的限制，在优化设计中称为约束条件。它的表现形式有两种，一种是不等式约束，即

$$g_u(\boldsymbol{x})\leqslant 0 \quad u=1,2,\cdots,m$$

或

$$g_u(\boldsymbol{x})\geqslant 0$$

另一种是等式约束，即

$$h_v(\boldsymbol{x})=0 \quad v=1,2,\cdots,p<n$$

式中　$g_u(\boldsymbol{x})$和 $h_v(\boldsymbol{x})$分别为设计变量的函数；m 和 p 分别表示不等式约束和等式约束的个数，而且等式约束的个数 p 必须小于设计变量的个数 n。因为从理论上讲，存在一个等式约束就可以用它消去一个设计变量，这样便可降低优化设计问题的维数。所以，当 $p=n$ 时，即可由 p 个方程组中解得唯一的一组 x_1，x_2，…，x_n 值。这样方案的选择就成为唯一的或确定的。

设计约束的形式如遇必要时也可以实现某些形式上的变化。如$g(\boldsymbol{x})\leqslant 0$可以变成$-g(\boldsymbol{x})\geqslant 0$。$h(\boldsymbol{x})=0$，也可以用$h(\boldsymbol{x})\geqslant 0$和$-h(\boldsymbol{x})\geqslant 0$两个不等式约束条件代替。

不等式约束及其有关概念，在优化设计中是相当重要的。每一个不等式约束(如 $g(\boldsymbol{x})\leqslant 0$)都把设计空间划分成两部分，一部分是满足该不等式约束条件的，即$g(\boldsymbol{x})<0$，另一部分则不满足，即$g(\boldsymbol{x})>0$。两部分的分界面叫做约束面，即由$g(\boldsymbol{x})=0$的点集构成。在二维设计空间中约束面是一条曲线或直线，在三维以上的设计空间中则是一个曲面或超曲面。一个优化设计问题的所有不等式约束的边界将组成一个复合约束边界，如图 9.7-2 表示了一个二维问题的情况。其约束边界所包围的区域（图中阴影线内）是设计空间中满足所有不等式约束条件的部分，在这个区域中所选择的设计变量是允许采用的，我们称这个区域为设计可行域，或简称为可行域，记作

$$\mathscr{D}=\{\boldsymbol{x}\mid g_u(\boldsymbol{x})\leqslant 0 \quad u=1,2,\cdots,m\}$$

当某项设计除有 m 个不等式约束条件外，还应满足 p 个等式约束条件时，即对设计变量的选择又增加了限制。例如图 9.7-2 所示，当有一个等式约束条件$h(x_1,x_2)=0$时，其可行设计方案只允许在 $\mathscr{D}$域内的等式约束函数曲线的 AB 段上选择。因此，在一般情形下，其设计可行域可表示为

$$\mathscr{D}=\left\{\boldsymbol{x}\left|\begin{array}{ll} g_u(\boldsymbol{x})\leqslant 0 & u=1,2,\cdots,m \\ h_v(\boldsymbol{x})=0 & v=1,2,\cdots,p<n\end{array}\right.\right\}$$

与此相反，除去可行域以外的设计空间称为非允许设计区域或简称非可行域。据此，在可行域内的任一设计点都代表了一个允许采用的设计方案，这样的点叫做可行设计点或内点，如 $\boldsymbol{x}^{(1)}$点；在约束边界上的点叫极限设计点或边界点，如点 $\boldsymbol{x}^{(3)}$。$\boldsymbol{x}^{(2)}$点则称为外点，即非可行点，该点为不允许采用的设计方案。

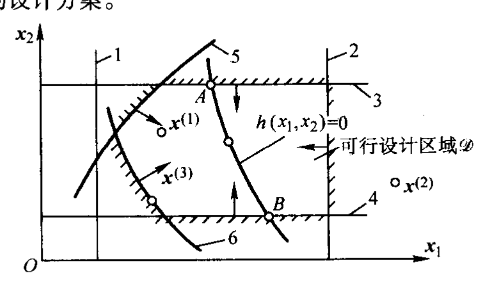


图 9.7-2　二维问题的可行域

1.4　优化设计的数学模型

数学模型是对实际问题的特征或本质的抽象，是反映各主要因素之间内在联系的一种数学形态。优化设计的数学模型在形式上要求规范化，即要求把优化设计问题描述成为一个数学规划问题，通常可归纳为：在满足一定的约束条件下，选取设计变量，使目标函数值达到最小（或最大），其数学表达式一般为

$$\left.\begin{array}{ll} \min & f(\boldsymbol{x}) \quad \boldsymbol{x}\in R^n \\ \text{s.t.} & g_u(\boldsymbol{x})\leqslant 0 \quad u=1,2,\cdots,m \\ & h_v(\boldsymbol{x})=0 \quad v=1,2,\cdots,p<n \end{array}\right\} \tag{9.7-4}$$

式中，R^n 为 n 维欧氏实空间，即设计空间；s.t. 表示“受约束于”。

数学模型按其中所含设计变量和参数的性质可分为确定型模型和随机型模型。

当设计变量和参数的取值为确定的数时，所建立的数学模型称为确定型模型。根据设计参数与时间的依赖关系，又可将确定型模型分为静态模型和动态模型。与时间无关或者可以忽略时间变动影响的，都属于静态模型。须考虑时间或其他因素变化的影响的均属于动态模型，如轧机主传动系统的扭振问题，若为了降低轧机主传动系统的动载荷，建立以扭矩放大系数最小为目标优选各连接件扭转刚度的模型，由于作用在轧辊上的外力矩，以及系统的动态响应均与时间有关，故该数学模型属于动态模型。

在确定型模型中，当设计变量可取任意实数时，属于连续变量优化设计模型。关于这类模型的建模方法及其求解原理，是本书所要讨论的主要内容。当某些或全部设计变量限于取整数或离散值时，则称这类模型为离散变量优化设计模型。

随机模型是指在建模中某些设计变量或参数具有随机性或必须考虑它们的概率分布性质来建立的数学模型，这是一类比较特殊的优化设计问题。

当目标函数$f(\boldsymbol{x})$和约束函数 $g_u(\boldsymbol{x})$都是设计变量的线性函数时，则称为线性规划问题，其数学模型的一般形式为

$$\left.\begin{array}{ll} \min & f(\boldsymbol{x})=\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} \quad \boldsymbol{x}\in R^n \\ \text{s.t.} & \boldsymbol{Ax}\geqslant \boldsymbol{B} \\ & \boldsymbol{x}\geqslant 0 \end{array}\right\} \tag{9.7-5}$$

式中，$\boldsymbol{C}$ 为 n 维常数列阵；$\boldsymbol{A}$ 为 $m\times n$ 阶常数矩阵；$\boldsymbol{B}$ 为 m 维常数列阵。

若目标函数$f(\boldsymbol{x})$、约束函数$g_u(\boldsymbol{x})$和 $h_v(\boldsymbol{x})$中有一个或多个是非线性函数，则称为非线性规划问题。多数优化设计问题的数学模型属于非线性规划问题。

由于非线性目标函数和约束函数表达式的特性不同，所以又可以将它分为一般非线性问题、二次规则问题、可分离规则问题、几何规划问题等。从计算观点来说，这种分类所以出现乃是它们都有其特殊的解法，但是一般说来，解一般非线性问题的方法也是可以用于求解这些特殊问题的。

若目标函数是设计变量的二次函数、约束函数是线性函数，则为二次规划问题。它的一般表达形式为

$$\left.\begin{array}{ll} \min & f(\boldsymbol{x})=\boldsymbol{C}+\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}+\dfrac{1}{2}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Ax} \quad \boldsymbol{x}\in R^n \\ \text{s.t.} & \boldsymbol{Qx}=\boldsymbol{D} \\ & \boldsymbol{x}\geqslant 0 \end{array}\right\} \tag{9.7-6}$$

若目标函数$f(\boldsymbol{x})$可表示为 n 个单变量的函数 $f_i(x_i)$($i=1,2,\cdots,n$)之和，函数是可分离的，则构成所谓可分离规划问题。它的一般表达形式为

$$\left.\begin{array}{ll} \min & f(\boldsymbol{x})=\displaystyle\sum_{i=1}^{n}f_i(x_i) \quad \boldsymbol{x}\in R^n \\ \text{s.t.} & \displaystyle\sum_{i=1}^{n}g_{ij}(x_i)\leqslant b_j \quad j=1,2,\cdots,m \end{array}\right\} \tag{9.7-7}$$

式中，b_j 为常量。

若目标函数和约束函数可表示为正项式或正负项式的非线性函数，则称为几何规划问题，即

$$
\left.\begin{aligned}
\min\ f(\boldsymbol{x}) &= \sum_{j=1}^{T_o} c_{oj} P_j(\boldsymbol{x}) \quad \boldsymbol{x} \in R^n \\
\text{s.t.}\ \ g_u(\boldsymbol{x}) &= \sum_{j=1}^{T_u} c_{uj} Q_{uj}(\boldsymbol{x}) \leqslant 1 \quad u = 1,2,\cdots,m \\
\boldsymbol{x} &\geqslant 0
\end{aligned}\right\} \tag{9.7-8}
$$

式中

$$P_j(\boldsymbol{x}) = \prod_{i=1}^{n} x_i^{a_{oji}}$$

$$Q_{uj}(\boldsymbol{x}) = \prod_{i=1}^{n} x_i^{a_{uji}}$$

其中 c_{oj}、c_{uj} 为可正可负的常数；a_{oji}、a_{uji} 为可正可负的实数。

根据数学模型中极小化的目标函数个数，优化问题可分为单目标和多目标优化问题。

当数学模型中不包含约束条件、即 $m=p=0$ 时，称它为无约束优化设计问题。虽然在工程设计问题中，不受任何约束条件限制的问题并不多见，但是在约束优化问题中有一些可将约束优化问题转化为无约束优化问题来求解。

2 常用优化设计方法

根据设计问题的不同，可以选用不同的优化设计方法。优化设计的方法很多，其分类一般是按照优化设计问题的数学模型进行的。图 9.7-3 所示为按有约束优化和无约优化进行分类的常用优化方法。

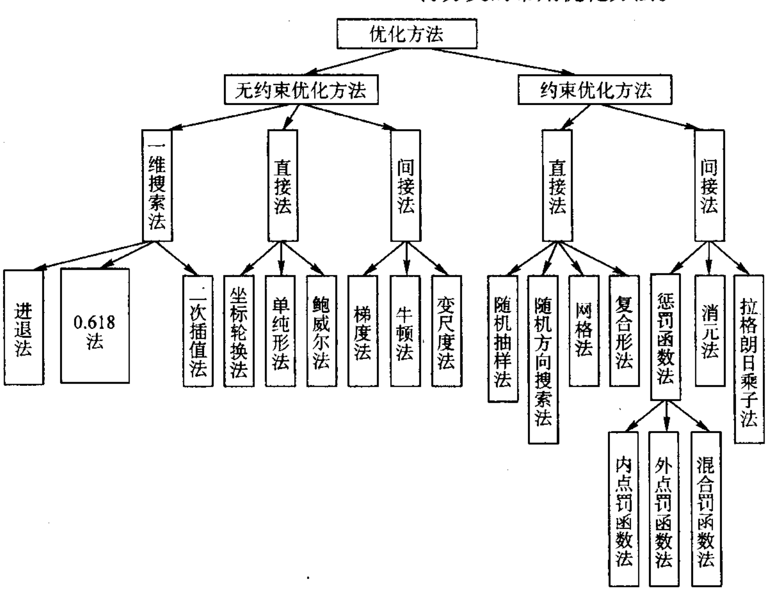


图 9.7-3 常用优化方法分类

在实际工程中，无约束条件的设计问题是非常少的，多数问题是有约束的。尽管如此，无约束优化方法仍然是优化设计的基本方法。因为约束优化问题可以通过对约束条件的处理而转化为无约束最优化问题来求解。

无约束优化方法又分为一维搜索法和多维搜索法。

一维搜索法是优化设计方法中最基本、最常用的方法。所谓搜索就是一步一步地搜寻，直至到达函数的近似极值点处。

求一维目标函数的极小点需分两步进行：第一步是确定搜索区间，搜索区间应为单峰函数，区间内目标函数应只有一个极小值；第二步是在此区间内求最优步长，使目标函数达到极小。第二步的基本原理是区间缩小法原则，即把搜索区间 $[a, b]$ 分成 3 段或 2 段，通过判断弃除无极小值的段，从而使区间逐步缩小，直至达到要求的精度为止，取最后区间中的某点作为近似极小点。对于已知搜索区间求极小点的问题，可直接调用 0.618 法或二次插值法等进行求解。

进退法主要用于确定搜索区间。通过进退法找到三个点，其中两端点的目标函数值大于中间的目标函数值，则两端点之间的区间内必然存在目标函数的极小值。

0.618 法每次区间缩短的比率是相同的，且等于 0.618。该方法步骤简单，不用导数。适用于低维优化或函数不可求导数或求导数有困难的情况，对连续或非连续函数均能获得较好的效果，实际应用范围较广，但效率偏低。

二次插值法是当找到目标函数的单峰区间后，利用目标函数上的三个点作二次插值多项式 $P(a_i)$ 构成插值函数，用插值函数来近似原目标函数。该方法的特点是易于计算极小点，搜索效率较高，适用于高维优化或函数连续可求导数的情况。但程序复杂，有时可靠性比 0.618 法差。

多维搜索法可分为直接法和间接法。

直接法求解多维优化问题时，一般采用爬山式的方法，即利用已有的信息，通过计算点一步一步地移动，逐步逼近并最后达到最优点。因此每移动一步的计算都应达到如下要求：获得目标函数的更好值；为下一步计算给出有用的信息。爬山法的搜索过程可概括为两个组成部分：一是选择爬山方向，即搜索方向，二是在确定的方向上选择适当的步长进行搜索。由于选取搜索方向的不同而有不同的爬山法，其中包括坐标轮换法、单纯形法和鲍威尔法等。

间接法是应用极值理论和解析方法，根据目标函数梯度的变化规律，计算目标函数的导数，从而间接地求出最优点的优化方法。常用间接法有梯度法、牛顿法和变尺度法等。

与无约束优化问题不同，约束优化问题中目标函数的最小值是满足约束条件下的最小值，即约束条件所限定的可行域内的最小值，而不一定是目标函数的自然最小值。约束优化问题的求解目标是：寻求一组设计变量，在满足约束条件下，使目标函数值最小。

约束条件可分为两类：等式约束和不等式约束。处理等式约束和不等式约束问题的方法有所不同，相应地约束优化方法也大致分为两类：直接法和间接法。

直接法主要用于求解仅含不等式约束条件的优化设计问题。当含有等式约束条件时，仅当等式约束条件函数不是复杂的隐函数，且消元过程容易实现时，才采用这种方法。其基本思想是在可行域内，按照一定的原则直接搜索出它的最优点而不需要将约束优化问题转化为无约束优化问题去求解。常用的有约束优化问题的直接法有随机抽样法、随机方



向搜索法、网格法、复合形法等。

间接解法对于等式约束和不等式约束问题均有效。其基本思想是按照一定的原则构造一个包含原目标函数和约束条件的新目标函数，即把约束优化问题的求解转换成无约束优化问题。显然，有约束优化问题通过这种方法处理，就可以采用有效的无约束优化方法来求解。常用的有约束优化问题的间接法有惩罚函数法、消元法和拉格朗日乘子法。

实际工程设计问题所涉及的因素十分复杂，形式各种各样，如何针对具体问题选择适用而有效的优化方法是很重要的。一般应考虑的因素主要包括：

1）优化设计问题的规模，即设计变量数目和约束条件数目的多少。

2）目标函数和约束函数的非线性程度、函数的连续性、等式约束或不等式约束以及函数数值计算的复杂程度。

3）优化方法的收敛性、计算效率和稳定性。

3　多维无约束优化方法

对于多变量的无约束优化问题，可采用直接法或间接法求解。所谓直接法，就是直接计算目标函数的值，通过一定的方法和步骤逐步逼近最优点。直接法包括坐标轮换法、单纯形法和鲍威尔（Powell）法等。间接法是采用解析方法，计算目标函数的导数，根据目标函数梯度的变化规律，间接地求出最优点。常用的间接法有梯度法、牛顿法和变尺度法等。

3.1　多维无约束优化问题的直接解法

3.1.1　坐标轮换法

先以二元函数来说明。图 9.7-4 所示为目标函数$f(x_1, x_2)$的等值线。若从 $\boldsymbol{x}^{(0)}=(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$ 点出发，先固定 $x_2=x_2^{(0)}$ 不变，改变 x_1 使其目标函数下降到最小值，即求 $\min f(x_1, x_2^{(0)})$，得 $\boldsymbol{x}_1^{(1)}=(x_1^{(1)}, x_2^{(0)})$；然后固定 $x_1=x_1^{(1)}$ 不变，再改变 x_2 又使其目标函数值减到最小值，即求 $\min f(x_1^{(1)}, x_2)$得 $\boldsymbol{x}_2^{(1)}=(x_1^{(1)}, x_2^{(1)})$ 点，至此完成了一轮计算。然后再开始第二轮，重复前面过程求得 $(\boldsymbol{x}_1^{(2)}, \boldsymbol{x}_2^{(2)})$ 点。如此继续下去，直至找到 (x_1^*, x_2^*) 点为止。

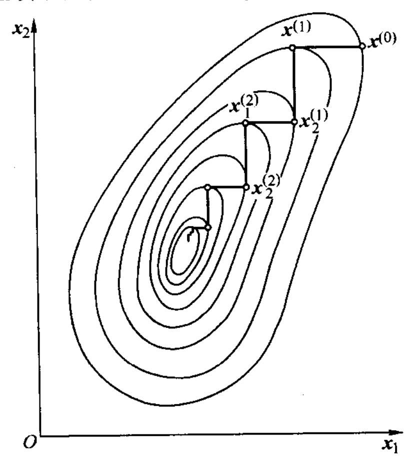


图 9.7-4　坐标轮换法原理图

所以坐标轮换法的基本原理是将一个多维的无约束最优化问题转化为一系列较低维的最优化问题来求解，简单地说，就是先将 $(n-1)$ 个变量固定不动，只对第一个变量进行一维搜索得到最优点 $\boldsymbol{x}_1^{(1)}$。然后，又保持 $(n-1)$ 个变量不变，再对第二个变量进行一维搜索到 $\boldsymbol{x}_2^{(1)}$ 点等等。总之，每次都固定 $(n-1)$ 个变量不变，只对目标函数的一个变量进行一维搜索，当 n 个变量 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 依此进行过一次搜索之后，即完成一轮计算。若未收敛，则又从前一轮的最末点开始，作下一轮搜索，如此继续下去，直至收敛到最优点为止。坐标轮换法就是由此而得名。

对于第 k 轮第 i 次的计算

$$\boldsymbol{x}_i^{(k)}=\boldsymbol{x}_{i-1}^{(k)}+\alpha_i^{(k)}\boldsymbol{s}_i^{(k)} \quad i=1, 2, \cdots, n。$$

式中，$\boldsymbol{x}_{i-1}^{(k)}$为第 k 轮第 i 次迭代初始点；$\boldsymbol{s}_i^{(k)}$ 为第 k 轮第 i 次迭代方向，它轮流取 n 维坐标的单位向量，即

$$\boldsymbol{s}_i^{(k)}=\boldsymbol{e}_i=\begin{bmatrix}0\\ \vdots\\ 1\\ \vdots\\ 0\end{bmatrix}\text{其中第 } i \text{ 个单位坐标方向为 1，其余为 0。}$$

$\alpha_i^{(k)}$ 为第 k 轮第 i 次迭代步长因子。

关于 $\alpha_i^{(k)}$ 值通常有以下几种取法。

（1）加速步长法

这个方法是先规定初始步长 ε_i，以便用它探测目标函数的下降方向。然后取初始步长的若干倍作为搜索步长，即 $t_i=\beta\varepsilon_i$。从 $\boldsymbol{x}_{i-1}^{(k)}$点出发，以 $\alpha=t_i$ 计算 x_i 坐标上的新点 $\boldsymbol{x}_i^{(k)}=\boldsymbol{x}_{i-1}^{(k)}+\alpha\boldsymbol{e}_1$，若 $f(\boldsymbol{x}_i^{(k)})<f(\boldsymbol{x}_{i-1}^{(k)})$，则取 $\alpha=2\alpha$ 继续前进，直到当 $\boldsymbol{x}_i^{(k)}$ 点的目标函数增大了，取前一点为本次的新点，然后改换坐标轴进行搜索，依此循环继续前进，直至当整个过程再也无法继续进行下去为止，当还达不到计算精度时，还可将 t_i 缩小，例如取 $t_i=(0.1\sim0.5)\varepsilon_i$；再从停留点出发重复前面的过程，直至到达收敛精度为止。这种方法的程序比较简单，且对于低维的优化设计问题，效果良好。

（2）最优步长法

最优步长法就是利用一维最优搜索方法来完成每一次迭代，即

$$\min_{\alpha} f(\boldsymbol{x}_{i-1}^{(k)}+\alpha\boldsymbol{s}_i^{(k)})=f(\boldsymbol{x}_{i-1}^{(k)}+\alpha_i^{(k)}\boldsymbol{s}_i^{(k)})$$

此时可以根据函数的变化情况确定一维搜索区间，然后用 0.618 方法或二次插值方法求出 $\alpha_i^{(k)}$ 值。如图 9.7-5 所示。在这种情况下，每一次沿坐标方向进行迭代计算，都使目标函数值降至最小。例如，从 $\boldsymbol{x}^{(0)}=[x_1^{(0)}, x_2^{(0)}]^{\mathrm{T}}$ 开始，先固定 $x_1=x_1^{(0)}$ 不变，以 x_2 为变量，即求 $\min f(x_1^{(0)}, x_2)$，得 $\boldsymbol{x}_1=[x_1^{(0)}, x_2^{(1)}]^{\mathrm{T}}$ 点，然后固定 $x_2=x_2^{(1)}$ 不变，改变 x_1 变量，又使目标函数值减到最小，即得 $\boldsymbol{x}_2=[x_1^{(1)}, x_2^{(1)}]^{\mathrm{T}}$ 点，至此完成一轮计算。以后开始第二轮，如此继续下去，直至计算到预定的收敛精度 $\|\alpha\boldsymbol{s}_i^{(k)}\|\leqslant\varepsilon$ 为止。

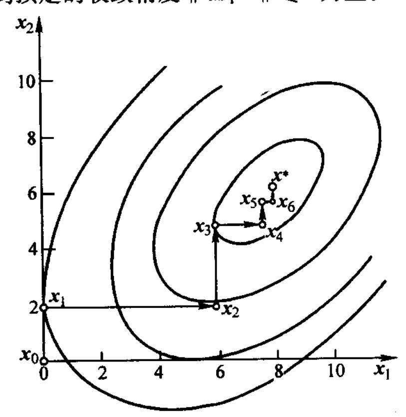


图 9.7-5　最优步长法

3.1.2　鲍威尔法（Powell 法）

鲍威尔法是直接利用函数值构造共轭方向的一种共轭方向法，其基本思想是不对目标函数作求导数计算，仅利用迭代点的目标函数构造共轭方向。共轭方向组的形成过程是这

样：即第一轮迭代由初始点 $x^{(0)}$ 出发，依次沿着 n 维目标函数的线性无关的 n 个坐标轴方向 S_i（$i=1, 2, \cdots, n$）进行一维优化搜索，并且以第 n 次搜索的最小点与初始点的连线作为下轮搜索的第 $n+1$ 次搜索方向。在第二轮搜索中则去掉第一轮 n 次搜索中目标函数值最大所对应的那一个方向，剩下的 n 个方向组成第二轮搜索要采用的新的搜索方向组。如此反复，直到满足精度要求为止。该方法收敛速度快，是直接搜索法中比坐标轮换法使用效果更好的一种算法，适用于维数较高的目标函数。

(1) 共轭方向

设二元函数 $f(x_1, x_2)$ 的极值点为 $x^* = [x_1^*, x_2^*]^T$，将函数在点 x^* 展开成 Taylor 级数，并取其二次项，若其 Hesse 矩阵为正定矩阵，则其目标函数的等值线在极值点附近是近似的同心椭圆簇。如图 9.7-6 所示，同心椭圆簇具有这样一个特点，就是二条任意平行线的切点的连线必通过椭圆族的中心。因此，如果沿两个互相平行的方向 s_1，s_1' 进行一维搜索，求出目标函数沿该两方向的极小点 $x^{(1)}$，$x^{(2)}$（此二点必为椭圆族中某二个椭圆与此二直线的切点）。则 $x^{(1)}$、$x^{(2)}$ 的连线必通过极小点。显然，只要沿 $x^{(1)}$，$x^{(2)}$ 连线方向（$s=x^{(2)}-x^{(1)}$）进行一维搜索，就可以找到目标函数的极小点。而且方向 s 对于 Hesse 矩阵 $H(x^*)$ 与 s_1 是共轭的。所谓共轭方向是：设 A 为 $n\times n$ 实对称正定矩阵，有一组非零的 n 维向量 s_1，s_2，……，s_q 若满足

$$s_i^T A s_j = 0 \quad i \neq j$$

则称两向量系 s_i（$i=1$，……，q）对于矩阵 A 共轭。

如果矩阵 A 为单位矩阵 I，则

$$s_i^T s_j = 0, \ (i \neq j)$$

此时，两向量为正交（垂直）。因此，从几何意义来理解，即向量 s_i（或 s_j）通过矩阵 A 进行线性变换后，可以使向量 s_i 与 s_j 得到正交向量。

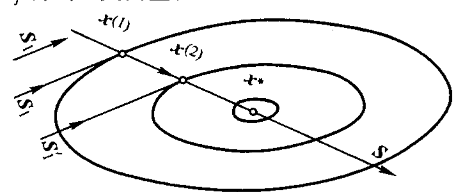


图 9.7-6 共轭方向

推而广之，在 n 维空间中可以找出 n 个互相共轭的方向，对于对称正定的二次 n 元函数，从任意初始点出发顺次沿着这 n 个互相共轭的方向进行一维最优化搜索，就可以求得目标函数的极小点。

对于 n 维目标函数 $f(x)$，求极小点的过程是：先用一组线性无关的初始方向组 $s_i^{(k)}$（通常最简单的是取坐标方向 e_i），$i=1, 2, \cdots, n$，依次沿此方向组的各个方向进行一维最优化搜索，并以初始点 $x_0^{(k)}$ 和终点 $x_n^{(k)}$ 连线作为新产生的共轭方向 $s_{n+1}^{(k)}$，若以 $s_{n+1}^{(k)}$ 方向作为下一步方向组 $s_i^{(k+1)}$（$i=1, 2, \cdots, n$）中的最后一个方向，并且去掉第一个方向 $s_1^{(k)}$，则组成的新方向组 $s_i^{(k+1)} = s_{i+1}^{(k)}$（$i=1, 2, \cdots, n$）应是线性无关的。这样进行 n 步迭代以后，原方向组将完全由新产生的一组共轭方向所代替，并且这些方向仍应该是互为共轭的方向，若目标函数是个 n 维的正定二次函数，即经过这样的 n 步以后，就可以收敛到最优点 x^*。但是，很不理想的是，用这种方法产生的 n 个新方向，有可能出现线性相关或近似线性相关的情况，因为，新方向 $s_{n+1}^{(k)} = x_n^{(k)} - x_0^{(k)} = \sum_{i=1}^{n}\alpha_i s_i^{(k)}$，倘若在迭代中出现了 $\alpha_1^{(k)}=0$（或 $\alpha_1^{(k)}\approx 0$）的情况，则 $s_{n+1}^{(k)}$ 就可以表示为 $s_2^{(k)}$，…，$s_n^{(k)}$ 的线性组合。由于在新组成的方向组 $s_i^{(k+1)}$ 中，恰好挤掉了 $s_1^{(k)}$，因此，$s_i^{(k+1)} = s_{i+1}^{(k)}$（$i=1, 2, \cdots, n$）方向组就成为线性相关的一组向量，以后各次搜索将在维数下降了的空间内进行，从而导致算法收敛不到真正的最优点上。为了克服算法的这种缺点，Powell 提出在每次获得新方向 $s_{n+1}^{(k)}$ 之后，在组成新的方向组时，不一定去掉方向 $s_1^{(k)}$，而是有选择地去掉其中某一个方向 $s_m^{(k)}$（$1\leqslant m\leqslant n$），以避免新方向组中的各方向出现线性相关的情形，保证新方向组比前一方向组具有更好的共轭性质。为此，导出是否用 $s_{n+1}^{(k)}$ 方向来组成新的搜索方向组的判别条件：

$$\left.\begin{aligned} &\text{若} \quad f_3 < f_1 \\ &\text{和} \quad (f_1 - 2f_2 + f_3)(f_1 - f_2 - \Delta_m)^2 < \frac{1}{2}\Delta_m(f_1 - f_3)^2 \end{aligned}\right\} \tag{9.7-9}$$

同时成立，则用 $s_{n+1}^{(k)}$ 方向，并且去掉第 $s_m^{(k)}$ 个方向，否则仍用原来的 n 个搜索方向。

式中 $f_1 = f(x_0^{(k)}), f_2 = f(x_n^{(k)}), f_3 = f(2x_n^{(k)} - x_0^{(k)})$

$$\Delta_m = \max_{1<i<n}\{f(x_{i-1}^{(k)}) - f(x_i^{(k)})\}$$

$s_m^{(k)}$ 为与 Δ_m 相对应的方向。

(2) 鲍威尔法的求解步骤

1) 给定初始点 x_0 和计算精度 ε，逐次沿 n 个线性无关的方向进行一维搜索：即

$$x_i^{(k)} = x_{i-1}^{(k)} + \alpha_i^{(k)} s_i^{(k)}, \quad i=1, 2, \cdots, n \tag{9.7-10}$$

式中 $s_i^{(k)}$——搜索方向，当 $k=1$

$$s_i^{(k)} = e_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \text{（第 } i \text{ 个坐标方向取为 1，其余为零）}$$

相当于用最优步长的坐标轮换法；

$\alpha_i^{(k)}$——优化步长。

2) 计算 k 轮中相邻二点目标函数值的下降量，并找出下降量最大者及其相应的方向

$$\Delta_m^{(k)} = \max\{\Delta_i^{(k)}\} = \max_{i=1,\cdots,n}\{f(x_{i-1}^{(k)}) - f(x_i^{(k)})\} \tag{9.7-11}$$

$$s_m^{(k)} = x_m^{(k)} - x_{m-1}^{(k)} \tag{9.7-12}$$

3) 沿共轭方向 $s^{(k)} = x_n^{(k)} - x_0^{(k)}$ 计算反射点

$$x_{n+1}^{(k)} = 2x_n^{(k)} - x_0^{(k)} \tag{9.7-13}$$

令 $f_1 = f(x_0^{(k)}), f_2 = f(x_n^{(k)}), f_3 = f(x_{n+1}^{(k)})$

若同时满足：

$$\left.\begin{aligned} &f_3 < f_1 \\ &(f_1 - 2f_2 + f_3)(f_1 - f_2 - \Delta_m^{(k)})^2 < 0.5\Delta_m^{(k)}(f_1 - f_3)^2 \end{aligned}\right\} \tag{9.7-14}$$

则由 $x_n^{(k)}$ 出发沿 $s^{(k)}$ 方向进行一维搜索，求出该方向的极小点 x^*，并以 x^* 作为 $k+1$ 轮的初始点，即 $x_0^{(k+1)} = x^*$；然后进行第 $k+1$ 轮搜索，其搜索方向去掉 $s_m^{(k)}$，并令 $s_n^{(k+1)} = s^{(k)}$，即

$$[s_1^{(k+1)}, s_2^{(k+1)}, \cdots, s_n^{(k+1)}] = [s_1^{(k)}, s_2^{(k)}, \cdots, s_{m-1}^{(k)}, s_{m+1}^{(k)}, \cdots, s_n^{(k)}, s^{(k)}]$$

4) 若上述替换条件不满足，则进入第 $k+1$ 轮搜索时，其 n 个方向全部用第 k 轮的搜索方向，而初始点则取 $x_n^{(k)}$ 和 $x_{n+1}^{(k)}$ 中函数值较小的点。

5) 每轮迭代结束时，都应该检验收敛条件。若满足

$$\| x_0^{(k+1)} - x_0^{(k)} \| \leqslant \varepsilon_1 \tag{9.7-15}$$

或

$$\left| \frac{f(x_0^{(k+1)}) - f(x_0^{(k)})}{f(x_0^{(k+1)})} \right| \leqslant \varepsilon_2 \tag{9.7-16}$$



则迭代计算可以结束。否则进行下一轮迭代。

3.2　多维无约束优化问题的间接解法

3.2.1　梯度法

梯度法又称一阶导数法，其基本思想是用目标函数值下降最快的负梯度方向作为搜索方向求极小值。虽然算法比较古老，但可靠性好，能稳定地使函数值不断下降。

设在第 $k-1$ 次迭代中，已取得 $\boldsymbol{x}^{(k)}$ 点，目标函数在这一点的梯度为

$$\boldsymbol{G}^{(k)}=\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)})=\left[\frac{\partial f(\boldsymbol{x}^{(k)})}{\partial x_1},\frac{\partial f(\boldsymbol{x}^{(k)})}{\partial x_2},\cdots,\frac{\partial f(\boldsymbol{x}^{(k)})}{\partial x_n}\right]^{\mathrm{T}}$$

因此，第 k 次迭代的搜索方向 $\boldsymbol{s}^{(k)}$ 取负梯度的单位向量，即

$$\boldsymbol{s}^{(k)}=\frac{-\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)})}{\|\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)})\|}=\frac{-\boldsymbol{G}^{(k)}}{\|\boldsymbol{G}^{(k)}\|} \qquad (9.7\text{-}17)$$

式中　$\|\boldsymbol{G}^{(k)}\|$——梯度向量的模。

这样，第 k 次迭代的新点 $\boldsymbol{x}^{(k+1)}$ 为

$$\boldsymbol{x}^{(k+1)}=\boldsymbol{x}^{(k)}+\alpha^{(k)}\boldsymbol{s}^{(k)} \qquad (9.7\text{-}18)$$

式中，$\alpha^{(k)}$ 为迭代的最优步长。

如此继续迭代，直至若 $\|\boldsymbol{G}^{(k)}\|\leqslant\varepsilon$，则取得 $f(\boldsymbol{x})$ 的最优点 $\boldsymbol{x}^*=\boldsymbol{x}^{(k)}$。

梯度法由于每次迭代的搜索方向是取函数的最速下降方向，因此容易使人认为，这种方法是一个使函数值下降最快的方法，但实际上并不是这样，计算表明，此法往往收敛得相当慢。这是由于梯度法的相邻两次搜索方向是相互正交的，所以，当二元二次函数的等值线是比较扁的椭圆时，其梯度法逼近函数极小值的过程呈直角锯齿状。如图 9.7-7 所示。

这种算法的优点是迭代过程简单，要求的存储量也少，而且在远离极小点时，函数下降还是比较快的。因此，常将它与其他方法结合，在计算的前期使用最速下降方向，当接近极小点时，再改用其他方向，以加快收敛速度。

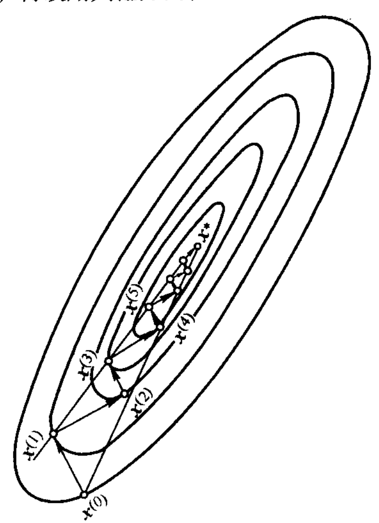


图 9.7-7　梯度法的收敛过程

3.2.2　共轭梯度法

如图 9.7-8 所示，共轭梯度法是以梯度法相邻两次迭代的负梯度方向 $-\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)})$、$-\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k+1)})$ 呈线性无关且互为正交这一点为基础而构造出的一种具有较高收敛速度的算法。这种算法的基本思想，是要在这两个向量为基底的子空间中找到一个向量 $\boldsymbol{s}^{(k+1)}$，使其与原方向 $\boldsymbol{s}^{(k)}$ 共轭。为此若将 $\boldsymbol{s}^{(k+1)}$ 向量表示成 $\boldsymbol{s}^{(k)}$ 与 $-\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k+1)})$ 向量的线性组合

$$\boldsymbol{s}^{(k+1)}=-\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k+1)})+\beta_k\boldsymbol{s}^{(k)} \qquad (9.7\text{-}19)$$

则要求向量 $\boldsymbol{s}^{(k+1)}$ 与 $\boldsymbol{s}^{(k)}$ 满足共轭性条件，即

$$[\boldsymbol{s}^{(k+1)}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{s}^{(k)}=0 \qquad (9.7\text{-}20)$$

这样，对于一个二维的正定二次型函数来说，只要沿此两个共轭方向 $\boldsymbol{s}^{(k)}$ 和 $\boldsymbol{s}^{(k+1)}$ 进行一维搜索，就可以求得目标函数的极小点。

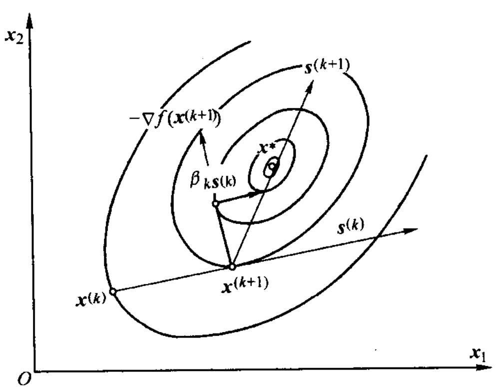


图 9.7-8　共轭梯度方向

设函数为二次型

$$f(\boldsymbol{x})=C+\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}+\frac{1}{2}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}$$

对于 $\boldsymbol{x}^{(k)}$ 和 $\boldsymbol{x}^{(k+1)}$ 点，若令 $g_k=\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)})$ 和 $g_{k+1}=\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k+1)})$，则有

$$g_k=\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)})=\boldsymbol{B}+\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}^{(k)}$$

$$g_{k+1}=\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k+1)})=\boldsymbol{B}+\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}^{(k+1)}$$

将上两式相减，并考虑到 $\boldsymbol{x}^{(k+1)}=\boldsymbol{x}^{(k)}+\alpha^{(k)}\boldsymbol{s}^{(k)}$，可得

$$g_{k+1}=g_k+\alpha^{(k)}\boldsymbol{A}\boldsymbol{s}^{(k)} \qquad (9.7\text{-}21)$$

若用 $[\boldsymbol{s}^{(k)}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}$ 左乘式 (9.7-19)，则得

$$[\boldsymbol{s}^{(k)}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{s}^{(k+1)}=-[\boldsymbol{s}^{(k)}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}g_{k+1}+\beta_k[\boldsymbol{s}^{(k)}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{s}^{(k)}$$

考虑到式 (9.7-20) 共轭性条件，上式的左边项为零，即有

$$\beta_k=\frac{[\boldsymbol{s}^{(k)}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}g_{k+1}}{[\boldsymbol{s}^{(k)}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{s}^{(k)}} \qquad (9.7\text{-}22)$$

为了使上式便于应用，必须消去式中的矩阵 $\boldsymbol{A}$。

经推导，最后得到计算 β_k 的公式

$$\beta_k=\frac{[\boldsymbol{s}^{(k)}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}g_{k+1}}{[\boldsymbol{s}^{(k)}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{s}^{(k)}}=\frac{g_{k+1}^{\mathrm{T}}g_{k+1}}{g_k^{\mathrm{T}}g_k}=\frac{\|\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k+1)})\|^2}{\|\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)})\|^2} \qquad (9.7\text{-}23)$$

共轭梯度的算法如下：

① 选取初始点 $\boldsymbol{x}^{(0)}$ 和计算收敛精度 ε。

② 令 $k=0$，计算 $\boldsymbol{s}^{(0)}=-\nabla f(\boldsymbol{x}^{(0)})$。

③ 沿 $\boldsymbol{s}^{(k)}$ 方向进行一维搜索，求 $\alpha^{(k)}$ 使

$$\min f(\boldsymbol{x}^{(k)}+\alpha\boldsymbol{s}^{(k)})=f(\boldsymbol{x}^{(k)}+\alpha^{(k)}\boldsymbol{s}^{(k)})$$

得
$$\boldsymbol{x}^{(k+1)}=\boldsymbol{x}^{(k)}+\alpha^{(k)}\boldsymbol{s}^{(k)}$$

④ 计算 $\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k+1)})$

若 $\|\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k+1)})\|\leqslant\varepsilon$，则终止迭代，取 $\boldsymbol{x}^*=\boldsymbol{x}^{(k+1)}$；若否，则进行下一步。

⑤ 检查搜索次数

若 $k=n$，则令 $\boldsymbol{x}^{(0)}=\boldsymbol{x}^{(k+1)}$，转向②；否则，进行⑥。

⑥ 构造新的共轭方向

$$\boldsymbol{s}^{(k+1)}=-\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k+1)})+\beta^{(k)}\boldsymbol{s}^{(k)}$$

$$\beta_k=\frac{\|\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k+1)})\|^2}{\|\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)})\|^2}$$

令 $k=k+1$，转向③。

共轭梯度法是以正定二次函数的共轭方向为基础的，因此，在理论上对于二次型函数而言，至多经过 n 步迭代必能达到极小点。但在实际计算时，由于舍入误差的影响，以及函数的非二次型，也不一定 n 次迭代就能达到极值点。如果在 n 次迭代后未达到收敛精度，则可以重置负梯度方向开始，直到满足精度为止。

3.2.3　牛顿法

牛顿法的基本思想是首先把目标函数近似表示为泰勒展

开式，并只取到二次项，然后不断地用二次函数的极值点近似逼近原目标函数的极值点，直到满足精度要求为止。该方法在一定条件下收敛速度快，尤其适用于目标函数为二次函数的情况。

设目标函数 $f(\boldsymbol{x})$ 为连续二阶可微，在给定点 $\boldsymbol{x}^{(k)}$ 展开成 Taylor 二次近似式，即

$$f(\boldsymbol{x}) \approx \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}^{(k)}) = f(\boldsymbol{x}^{(k)}) + [\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)})]^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^{(k)}) + \frac{1}{2}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^{(k)})^{\mathrm{T}} H(\boldsymbol{x}^{(k)})(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^{(k)}) \tag{9.7-24}$$

对于二次函数 $\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x})$，当 $\nabla\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x})=0$ 时，求得的 $\boldsymbol{x}$ 即为极小点 $\boldsymbol{x}_{\min}$。

由式（9.7-24）可得

$$\nabla\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}) = \nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)}) + H(\boldsymbol{x}^{(k)})(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^{(k)}) = 0$$

因此得

$$\boldsymbol{x}_{\min} = \boldsymbol{x}^{(k)} - [H(\boldsymbol{x}^{(k)})]^{-1}\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)}) \tag{9.7-25}$$

式中，$[H(\boldsymbol{x}^{(k)})]^{-1}$ 为 Hesse 矩阵的逆矩阵。

在一般情况下，$f(\boldsymbol{x})$ 不一定是二次函数，因而 $\boldsymbol{x}_{\min}$ 也不可能是 $f(\boldsymbol{x})$ 的极值点。但是由于在 $\boldsymbol{x}^{(k)}$ 点附近，函数 $\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x})$ 和 $f(\boldsymbol{x})$ 是近似的，所以可以用 $\boldsymbol{x}_{\min}$ 点作为下一次迭代点 $\boldsymbol{x}^{(k+1)}$，即得

$$\boldsymbol{x}^{(k+1)} = \boldsymbol{x}^{(k)} - [H(\boldsymbol{x}^{(k)})]^{-1}\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)}) \tag{9.7-26}$$

如果目标函数 $f(\boldsymbol{x})$ 是正定二次函数，那么 $H(\boldsymbol{x})$ 是个常矩阵，逼近式（9.7-25）是准确的。因此，由 $\boldsymbol{x}^{(k)}$ 点出发只要迭代一次即可求出 $f(\boldsymbol{x})$ 的极小点。

当目标函数为非二次函数时，式（9.7-24）仅是目标函数在 $\boldsymbol{x}^{(k)}$ 点附近的一种近似表达式，求得的极小点，当然也是近似的，需要继续迭代。但是当目标函数严重非线性时，用式（9.7-26）进行迭代则不能保证一定收敛，即在迭代中可能出现 $f(\boldsymbol{x}^{(k+1)}) > f(\boldsymbol{x}^{(k)})$，所得到的新点还不如原来的点好。这和初始点的选择是否恰当有很大关系。为了克服这一缺点，可以采取由 $\boldsymbol{x}^{(k)}$ 出发沿方向 $\boldsymbol{s}^{(k)} = -[H(\boldsymbol{x}^{(k)})]^{-1}\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)})$ 对原目标函数 $f(\boldsymbol{x})$ 进行一维搜索，即

$$\boldsymbol{x}^{(k+1)} = \boldsymbol{x}^{(k)} - \alpha^{(k)}[H(\boldsymbol{x}^{(k)})]^{-1}\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)}) \tag{9.7-27}$$

式中，$\alpha^{(k)}$ 为一维搜索所得的最优步长因子；而将 $\boldsymbol{s}^{(k)} = -[H(\boldsymbol{x}^{(k)})]^{-1}\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)})$ 称为牛顿方向。

经过这种修改的算法称为修正牛顿法，也称牛顿方向法。它是牛顿法的一种改进算法，它保持了牛顿法收敛快的特性，而又放宽了对初始点选择的要求，并能保证每次迭代都使目标函数值下降。

牛顿法和修正牛顿法的缺点是要求 $H(\boldsymbol{x}^{(k)})$ 是非奇异的，需要计算二阶偏导数，还要求逆矩阵，计算工作量大。

3.2.4 变尺度法

变尺度法是对牛顿法的修正，它不用计算二阶导数的矩阵和它的逆阵，而是设法构造一个对称正定矩阵 $[H^{(k)}]$ 来代替 Hesse 矩阵的逆阵 $[H(\boldsymbol{x}^{(k)})]^{-1}$，并在迭代过程中，使其逐渐逼近 $[H(\boldsymbol{x}^{(k)})]^{-1}$。因此，一旦达到极值点附近，就可望达到牛顿法的收敛速度，同时又避免了矩阵的求逆计算。由于对称矩阵 $[H^{(k)}]$ 在迭代过程中是不断修正改变的，而且从式（9.7-27）可以看出，它对一般尺度的梯度 $\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)})$ 起到改变尺度的作用，因此称 $H^{(k)}$ 为变尺度矩阵。变尺度法减少了计算量，又保持了牛顿法收敛快的优点，是求解高维数无约束问题的最有效的算法。

根据变尺度法的基本思想，需要构造一个矩阵 $H^{(k)}$，使其得到的搜索方向

$$\boldsymbol{s}^{(k)} = -H^{(k)}\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)}) \tag{9.7-28}$$

必须具有下降性，即构造的 $H^{(k)}$ 必须使 $\boldsymbol{s}^{(k)}$ 为函数的下降方向。可以证明，只要构造的矩阵 $H^{(k)}$ 为对称正定矩阵，$\boldsymbol{s}^{(k)}$ 就是下降方向。

构造矩阵 $H^{(k)}$ 除必须为正定矩阵外，为了使它逐渐逼近矩阵 $[H(\boldsymbol{x}^{(k)})]^{-1}$，所以还要满足拟牛顿条件。设将目标函数展为 Taylor 的二次近似式

$$f(\boldsymbol{x}) \approx f(\boldsymbol{x}^{(k)}) + [\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)})]^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^{(k)}) + \frac{1}{2}[\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^{(k)}]^{\mathrm{T}} H(\boldsymbol{x}^{(k)})[\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^{(k)}]$$

并取其梯度，令

$$g = \nabla f(\boldsymbol{x}) = \nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)}) + H(\boldsymbol{x}^{(k)})[\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^{(k)}]$$

设 $g^{(k)} = \nabla f(\boldsymbol{x}^{(k)})$，若 $\boldsymbol{x}^{(k+1)}$ 为极值点附近的第 $k+1$ 次的迭代点，则

$$g^{(k+1)} = \nabla f(\boldsymbol{x}^{(k+1)}) = g^{(k)} + H(\boldsymbol{x}^{(k)})[\boldsymbol{x}^{(k+1)}-\boldsymbol{x}^{(k)}]$$

所以 $g^{(k+1)} - g^{(k)} = H(\boldsymbol{x}^{(k)})[\boldsymbol{x}^{(k+1)}-\boldsymbol{x}^{(k)}]$

或 $\boldsymbol{x}^{(k+1)} - \boldsymbol{x}^{(k)} = [H(\boldsymbol{x}^{(k)})]^{-1}(g^{(k+1)} - g^{(k)})$

若用一矩阵 $H^{(k+1)}$ 来逼近 $[H(\boldsymbol{x}^{(k)})]^{-1}$，就必须满足

$$H^{(k+1)}(g^{(k+1)} - g^{(k)}) = \boldsymbol{x}^{(k+1)} - \boldsymbol{x}^{(k)}$$

令 $\Delta\boldsymbol{x}^{(k)} = \boldsymbol{x}^{(k+1)} - \boldsymbol{x}^{(k)}, \Delta g^{(k)} = g^{(k+1)} - g^{(k)}$

则得 $H^{(k+1)}\Delta g^{(k)} = \Delta x^{(k)}$

这就是近似矩阵 $H^{(k+1)}$ 应满足的基本关系式，称为 DFP 条件，或拟牛顿条件。在这个关系式中，只含有梯度和向量的信息，也就是说，可通过 $\Delta g^{(k)}$ 和 $\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}$ 信息来构造矩阵 $[H^{(k+1)}]$。

设变尺度矩阵有如下递推形式，

$$H^{(k+1)} = H^{(k)} + E^{(k)},\quad k=0,1,2,\cdots\cdots \tag{9.7-30}$$

式中 $E^{(k)}$ 称为第 k 次的修正矩阵，要求它只依赖于当前的已知量 $\boldsymbol{x}^{(k+1)}$，$\boldsymbol{x}^{(k)}$ 及其梯度 $g^{(k+1)}$，$g^{(k)}$。当 $k=0$ 时，取 $H^{(0)} = I$。

为了使 $H^{(k+1)}$ 满足 DFP 条件，必须有

$$(H^{(k)} + E^{(k)})\Delta g^{(k)} = \Delta\boldsymbol{x}^{(k)}$$

$$E^{(k)}\Delta g^{(k)} + H^{(k)}\Delta g^{(k)} = \Delta\boldsymbol{x}^{(k)}$$

即

$$E^{(k)}\Delta g^{(k)} = \Delta\boldsymbol{x}^{(k)} - H^{(k)}\Delta g^{(k)} \tag{9.7-31}$$

根据上式的关系，可以设想取 $E^{(k)}$ 为最简单的形式

$$E^{(k)} = \Delta\boldsymbol{x}^{(k)} q_k^{\mathrm{T}} - H^{(k)}\Delta g^{(k)} W_k^{\mathrm{T}} \tag{9.7-32}$$

式中 q_k 和 W_k 是待定的两个向量。

将式（9.7-32）乘以 $\Delta g^{(k)}$，则

$$E^{(k)}\Delta g^{(k)} = \Delta\boldsymbol{x}^{(k)} q_k^{\mathrm{T}}\Delta g^{(k)} - H^{(k)}\Delta g^{(k)} W_k^{\mathrm{T}}\Delta g^{(k)}$$

由于向量的内积是一个数，所以上式又可写成

$$E^{(k)}\Delta g^{(k)} = (q_k^{\mathrm{T}}\Delta g^{(k)})\Delta\boldsymbol{x}^{(k)} - (W_k^{\mathrm{T}}\Delta g^{(k)}) H^{(k)}\Delta g^{(k)} \tag{9.7-33}$$

如果选取向量 q_k 和 W_k 使内积

$$q_k^{\mathrm{T}}\Delta g^{(k)} = W_k^{\mathrm{T}}\Delta g^{(k)} = 1 \tag{9.7-34}$$

那么式（9.7-33）就与式（7.7-31）完全相同。现在令

$$q_k = \lambda_k\Delta\boldsymbol{x}^{(k)},\quad W_k = \mu_k H^{(k)}\Delta g^{(k)} \tag{9.7-35}$$

式中 λ_k 和 μ_k 为两个待定的系数。

将式（7.7-35）代入式（7.7-34）得

$$\lambda_k[\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}]^{\mathrm{T}}\Delta g^{(k)} = \mu_k[H^{(k)}\Delta g^{(k)}]^{\mathrm{T}}\Delta g^{(k)} = 1$$

所以得

$$\lambda_k = \frac{1}{[\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}]^{\mathrm{T}}\Delta g^{(k)}} \text{和} \mu_k = \frac{1}{[H^{(k)}\Delta g^{(k)}]^{\mathrm{T}}\Delta g^{(k)}}$$

于是可求得待定向量

$$q_k = \frac{\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}}{[\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}]^{\mathrm{T}}\Delta g^{(k)}} \qquad W_k = \frac{H^{(k)}\Delta g^{(k)}}{[H^{(k)}\Delta g^{(k)}]^{\mathrm{T}}\Delta g^{(k)}}$$

代入式（9.7-32），即得校正矩阵的计算公式为

$$E^{(k)} = \frac{\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}[\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}]^{\mathrm{T}}}{[\Delta g^{(k)}]^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}} - \frac{H^{(k)}\Delta g^{(k)}[\Delta g^{(k)}]^{\mathrm{T}}H^{(k)}}{[\Delta g^{(k)}]^{\mathrm{T}}H^{(k)}\Delta g^{(k)}}$$

从而得

$$H^{(k+1)} = H^{(k)} + \frac{\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}[\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}]^{\mathrm{T}}}{[\Delta g^{(k)}]^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}} - \frac{H^{(k)}\Delta g^{(k)}[\Delta g^{(k)}]^{\mathrm{T}}H^{(k)}}{[\Delta g^{(k)}]^{\mathrm{T}}H^{(k)}\Delta g^{(k)}} \tag{9.7-36}$$



上式称为 DFP 公式。按这一公式来构造矩阵 $H^{(k+1)}$，再产生 DFP 搜索方向以进行逐次迭代。最初的矩阵 $H^{(0)}$ 可以取单位矩阵 $\boldsymbol{I}$，即第一次的搜索方向就是最速下降方向。

由上述推导，可得到以下变尺度法的算法：

① 选取初始点 $\boldsymbol{x}^{(0)}$，确定计算精度要求 ε。

② 令 $k=0$，$H^{(0)}=\boldsymbol{I}$，计算 $\nabla f(\boldsymbol{x}^{(0)})$ 和拟牛顿方向

$$\boldsymbol{s}^{(k)}=-H^{(0)}\nabla f(\boldsymbol{x}^{(0)})$$

③ 进行一维搜索求 $\alpha^{(k)}$，使

$$\min f(\boldsymbol{x}^{(k)}+\alpha\boldsymbol{s}^{(k)})\text{ 得}$$

$$\boldsymbol{x}^{(k+1)}=\boldsymbol{x}^{(k)}+\alpha^{(k)}\boldsymbol{s}^{(k)}$$

④ 检验精度，计算 $\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k+1)})$，若 $\|\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k+1)})\|\leqslant\varepsilon$，则停止，其最小点为 $\boldsymbol{x}^*\approx\boldsymbol{x}^{(k+1)}$。

若否，则进行下一步。

⑤ 检查迭代次数，若 $k=n$，则重置，从负梯度方向开始，并取 $\boldsymbol{x}^{(0)}=\boldsymbol{x}^{(k+1)}$。否则，进行下一步。

⑥ 构造新的拟牛顿方向

$$\boldsymbol{s}^{(k+1)}=-H^{(k+1)}\nabla f(\boldsymbol{x}^{(k+1)})$$

$$H^{(k+1)}=H^{(k)}+E^{(k)}$$

$$E^{(k)}=\frac{\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}[\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}]^{\mathrm{T}}}{[\Delta\boldsymbol{g}^{(k)}]^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}}-\frac{H^{(k)}\Delta\boldsymbol{g}^{(k)}[\Delta\boldsymbol{g}^{(k)}]^{\mathrm{T}}H^{(k)}}{[\Delta\boldsymbol{g}^{(k)}]^{\mathrm{T}}H^{(k)}\Delta\boldsymbol{g}^{(k)}}$$

令 $k=k+1$，转向③。

DFP 变尺度法不需要求 Hesse 矩阵及其逆阵，但需利用一阶导数信息。由于 DFP 法开始时是梯度法，所以从任一初始点通过梯度方向找到一个比较好的迭代点，这为以后的逐次迭代，创造了有利的条件。但是，DFP 变尺度法虽收敛速度较快，它也存在数值计算稳定性较差的问题，于是人们又提出了另一种变尺度法——BFGS 变尺度法，这种方法与 DFP 方法的不同之处，在于近似矩阵的计算不同。它的公式为

$$H^{(k+1)}=H^{(k)}+\frac{\mu_k\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}[\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}]^{\mathrm{T}}-H^{(k)}\Delta\boldsymbol{g}^{(k)}[\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}]^{\mathrm{T}}-[\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}]^{\mathrm{T}}[\Delta\boldsymbol{g}^{(k)}]H^{(k)}}{[\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}]^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{g}^{(k)}}$$

式中

$$\mu_k=1+\frac{[\Delta\boldsymbol{g}^{(k)}]^{\mathrm{T}}H^{(k)}\Delta\boldsymbol{g}^{(k)}}{[\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}]^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{g}^{(k)}}$$

由于 BFGS 变尺度法对一维最优化搜索精度要求较低，因而，在迭代中 $H^{(k)}$ 不易退化为病态矩阵，从而保证了算法数值计算的稳定性。

4　有约束优化方法

在塑性工程问题中，绝大多数的问题是属于非线性规划问题，其数学模型为

$$\begin{aligned}&\min\ f(\boldsymbol{x}) && \boldsymbol{x}\in R^n\\&\text{s.t.}\ g_u(\boldsymbol{x})\leqslant 0 && u=1,2,\cdots,m\\&\quad\ h_v(\boldsymbol{x})=0 && v=1,2,\cdots,p<n\end{aligned}$$

求解这类问题的方法通常称为有约束优化方法。根据求解方式的不同可以分为直接解法和间接解法两类。

直接解法是在满足不等式约束 $g_u(\boldsymbol{x})\leqslant 0$（$u=1,2,\cdots,m$）的可行设计区域内直接求出问题的约束最优解 $\boldsymbol{x}^*$ 和 $f(\boldsymbol{x}^*)$。属于这类方法的有随机抽样法、随机方向搜索法、复合形法、可行方向法、梯度投影法等。其中随机方向搜索法和复合形法在优化设计中应用最为广泛。随机抽样法比较简单，但对于多维问题其计算量比较大。由于方法甚多，在这里只介绍随机方向搜索法和复合形法。

间接解法是将约束优化问题转化为一系列无约束优化问题来解的一种方法。由于这类方法可以选用有效的无约束优化方法，且易于处理同时具有不等式约束和等式约束的问题，因而也得到了广泛的应用，其中最有代表性的就是惩罚函数法，即 SUMT 法。

4.1　有约束优化问题的直接解法

直接解法的特点是原理比较简单，方法比较适用，整个求解过程在可行域内进行，因而所得的任一设计方案都是可行的。通常较便于求解只含有不等式约束的优化问题。其基本思想是：在由 m 个不等式约束条件 $g_u(\boldsymbol{x})\leqslant 0$ 所确定的可行域 $\mathscr{D}$ 内，选择一个初始点 $\boldsymbol{x}^{(0)}$，然后确定一个可行搜索方向 $\boldsymbol{s}$，且以适当的步长沿 $\boldsymbol{s}$ 方向进行搜索，取得一个目标函数值有所改善的可行的新点 $\boldsymbol{x}^{(1)}$，即完成了一次迭代。以新点为起点重复上述搜索过程，每次均按如下的基本迭代格式进行计算：

$$\boldsymbol{x}^{(k+1)}=\boldsymbol{x}^{(k)}+\alpha^{(k)}\boldsymbol{s}^{(k)}\quad(k=0,1,2,\cdots)$$

逐步趋向最优解，直到满足终止准则才停止迭代。如果目标函数为凸函数，且可行域为凸集，则可以保证获得全域最优解。否则，将由于选择的初始点不同，会搜索到不同的局部最优解上，即其计算结果将与初始点的选择有关。为了尽可能取得全域最优解，最好能选用若干个差别较大的初始点进行计算，以便从不同的局部最优解中再择其最优者。

4.1.1　随机方向搜索法

随机方向搜索法的基本思想是每次都从前一迭代点 $\boldsymbol{X}^{(k)}$ 出发，用随机产生的若干方向逐一进行试探，以满足 $F(\boldsymbol{X}^{(k+1)})<F(\boldsymbol{X}^{(k)})$ 的方向作为选定的搜索方向。得到新点后，再以该点为始点产生随机方向，并进行新的试探，产生新的使函数下降的方向。依次连续进行迭代，直至逼近目标函数的极小点，即任何方向和任何步长均不能使函数下降或下降很小时为止。最后的迭代点即为近似的极小点。该方法是从许多方向中随机选出较好的方向，加之可随机变更步长，因此收敛速度较快。但是，为了避免所求得的结果仅仅是局部最优解，常常需要选择几个不同的初始点，从几次计算结果中作出正确分析，得出全局最优解。

对于求解

$$\begin{aligned}&\min\ f(\boldsymbol{x}) && \boldsymbol{x}\in R^n\\&\text{s.t.}\ g_u(\boldsymbol{x})\leqslant 0 && u=1,2,\cdots,m\end{aligned}$$

的约束非线性规划问题，采用随机方向搜索法的迭代格式为

$$\boldsymbol{x}^{(k+1)}=\boldsymbol{x}^{(k)}+\alpha\boldsymbol{s}^{(k)}\quad k=0,1,\cdots\tag{9.7-37}$$

式中，$\boldsymbol{s}^{(k)}$ 为第 k 次迭代的随机搜索方向；α 为所用的步长因子。

在这种算法中，搜索方向和步长因子都要根据目标函数的下降性和约束条件的可行性进行随机的调整，换句话说，即每一次迭代所计算出来的新点，其目标函数值必须是减小的，而且必须是可行的。这样才能随着迭代过程的进行，保证迭代点逐步向约束的最小点逼近，最终收敛于约束最优解上。

如图 9.7-9 所示，在约束可行域内选取一个初始点 $\boldsymbol{x}^{(0)}$。为了确定本次迭代的搜索方向，以若干个不同方向的向量 $\Delta\boldsymbol{x}$ 进行试验性的探索，若 $f(\boldsymbol{x}^{(0)}+\Delta\boldsymbol{x})<f(\boldsymbol{x}^{(0)})$，则以 $\Delta\boldsymbol{x}$ 为搜索方向，取适当步长因子，在不破坏约束条件的情况下，前进一步，取得新点 $\boldsymbol{x}$，若 $f(\boldsymbol{x})<f(\boldsymbol{x}^{(0)})$，则将起始点移至 $\boldsymbol{x}$ 点，重复前面的过程。否则，需将步长因子缩短，直至取得一个好的可行点，直至迭代步长已经很小时，就可结束计算过程，取得约束最优解。

随机方向搜索法在确定初始点、搜索方向和搜索步长时，都需要涉及随机数问题，即需要利用计算机产生随机数。

随机方向搜索法需要用到大量的［0，1］区间内均匀分布的随机数。这些随机数系从概率密度为均匀分布的随机变量中抽样所得的随机数列 $\{t_0,t_1,t_2,\cdots\}$ 来产生，要求

它具有较好的概率统计特性。产生随机数的方法很多，用数学模型产生的随机数称为伪随机数。目前常用的是乘同余法，它以产生周期长、统计性质优而获得广泛应用。调用其子程序即可得［0，1］区间内均匀分布的伪随机数列。

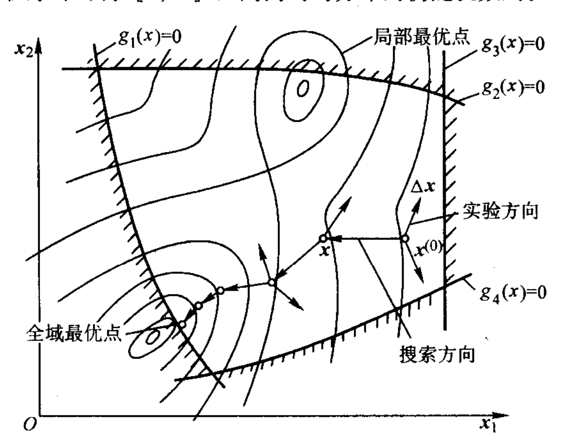


图 9.7-9　随机方向搜索法基本原理

若已产生了［0，1］区间上的伪随机数 r，则通过变换可以求得任意区间［a，b］内的伪随机数 R

$$R=a+r(b-a) \tag{9.7-38}$$

随机方向搜索法的初始点 $x^{(0)}$ 必须是一个可行点，即满足全部约束条件

$$g_u\left(x^{(0)}\right)\leqslant 0 \qquad u=1,2,\cdots,m$$

为此，可在可行域内人为地确定一个可行的初始点。当约束条件比较简单时，这种方法是可用的。当约束条件比较复杂时，可利用计算机产生的伪随机数来选择一个可行的初始点 $x^{(0)}$。此时需要输入对设计变量估计的上限值和下限值，即

$$a_i\leqslant x_i\leqslant b_i \qquad i=1,2,\cdots n$$

这样，所产生的随机点的各分量为

$$x_i^{(0)}=a_i+r_i\left(b_i-a_i\right) \qquad i=1,2,\cdots n$$

式中，r_i 为［0，1］区间内服从均匀分布的伪随机数。

如果产生的随机点不满足所有的约束条件，则另取伪随机数再产生一个随机点。直到产生一个可行的随机点为止。

利用伪随机数可以用不同的方法产生随机搜索方向 s。

以二维问题为例，若 r 为以弧度角计的［0，2π］区间内均匀分布的伪随机数，则可用下式产生 N 个随机单位向量

$$e^{(j)}=\left[\cos r^{(j)},\sin r^{(j)}\right] \quad j=1,2,\cdots,N \tag{9.7-39}$$

若以直角坐标计，$r_1^{(j)}$，$r_2^{(j)}$ 为［－1，1］区间内均匀分布的伪随机数，则可用下式产生 N 个随机单位向量

$$e^{(j)}=\frac{1}{\left\{\left(r_1^{(j)}\right)^2+\left(r_2^{(j)}\right)^2\right\}^{1/2}}\begin{bmatrix}r_1^{(j)}\\ r_2^{(j)}\end{bmatrix} \quad j=1,2,\cdots,N \tag{9.7-40}$$

取得 N 个随机单位向量后，可按下式产生 N 个随机试验点

$$x^{(j)}=x^{(0)}+H_0e^{(j)} \quad j=1,2,\cdots,N \tag{9.7-41}$$

式中，H_0 为试验步长因子，一般可取为 0.1 或 0.01，或者更小一点。

然后，检查试验点是否为可行点，计算可行试验点的目标函数值，比较它们的大小，选出其中目标函数值最小的点 $x^{(L)}$，即

$$f(x^{(L)})=\min\{f(x^{(j)}),j=1,2,\cdots,N;\text{非可行点除外}\} \tag{9.7-42}$$

若 $f(x^{(L)}<f(x^{(0)})$，则取 $x^{(0)}$ 和 $x^{(L)}$ 的连线方向作为搜索方向，即

$$s=x^{(L)}-x^{(0)} \tag{9.7-43}$$

沿已确定的搜索方向 s 进行搜索，从而取得一个目标函数值有所下降且满足约束条件的新的迭代点。其计算公式为

$$x^{(k+1)}=x^{(k)}+\alpha s^{(k)} \quad k=0,1,2,\cdots \tag{9.7-44}$$

式中，$x^{(k)}$ 为已确定的第 $k-1$ 次迭代点；$s^{(k)}$ 为第 k 次迭代的随机搜索方向；α 为待定的步长因子。

通常，步长因子 α 的确定有两种方法：一种是定步长法，即步长按规定长度等差递增，只要所得新点的目标函数值是下降的且满足约束条件，就在原基础上增加一个规定的步长向前移动，直至违背了约束条件或目标函数的下降性条件，于是迭代点由起始点移到新点。另一种是变步长法，即步长按一定的倍增系数等比递增或递减，这样可以减少计算工作量，提高计算效率。

按照上述算法，当一次迭代的初始点与终点的函数值达到

$$\left|\frac{f(x)-f\left(x^{(0)}\right)}{f\left(x^{(0)}\right)}\right|\leqslant\varepsilon_1 \tag{9.7-45}$$

和其步长达到

$$\left\|x-x^{(0)}\right\|\leqslant\varepsilon_2 \tag{9.7-46}$$

时，即结束搜索过程。其最优解为$x^*=x, f(x^*)=f(x)$。

4.1.2　复合形法

复合形法是单纯形法的基础上形成的。单纯形是在 n 维设计空间内由 $n+1$ 个顶点构成的多面体。所谓复合形，指的是在 n 维设计空间中由 $n+1\sim 2n$ 个顶点构成的多面体。

复合形法的基本思想是先在可行域内产生一个具有大于 $n+1$ 个顶点的初始复合形，然后对其各顶点函数值进行比较，判断目标函数值的下降方向。不断地舍弃最差点而代之以满足约束条件且使目标函数下降的新点。如此反复，使复合形不断向最优点移动和收缩，直到满足精度要求为止。该方法不需计算目标函数的梯度及二阶导数矩阵，计算量少，简明易行，工程设计中较为实用。

由于复合形是一种在可行域内直接求优的方法，因此要求第一个复合形就必须在可行域内生成。为此，k 个复合形顶点必须是可行点，通常顶点数取 $n+1\leqslant k\leqslant 2n$。最初的顶点可以由设计者给定，也可以用随机的方法产生。

复合形法搜索方向的确定是利用复合形各顶点目标函数值大小的关系，判断目标函数的下降方向。如果问题的维数 $n=2$，取顶点数 $k=4$，则在可行域内构成的复合形为一四边形，如图 9.7-10 所示。设四个顶点的函数值分别为 $f(x^{(1)})$、$f(x^{(2)})$、$f(x^{(3)})$、$f(x^{(4)})$。若 $f(x^{(1)})>f(x^{(2)})>f(x^{(3)})>f(x^{(4)})$，则称 $x^{(1)}$ 为最坏点，用 $x^{(H)}$ 表示；$x^{(2)}$ 为次坏点，用 $x^{(G)}$ 表示；$x^{(4)}$ 为最好点，用 $x^{(L)}$ 表示。然后，求出除最坏点外其余各顶点的点集中心，或称几何中心点 $x^{(S)}$。一般地，连接最坏点 $x^{(H)}$ 和中心点 $x^{(S)}$ 的方向为目标函数的下降方向，沿此方向可得一个较好的顶点 $x^{(R)}$ 来替换原复合形中的最坏点，从而组成新的复合形。自然，$x^{(R)}$ 应是满足 $f(x^{(R)})<f(x^{(H)})$ 的可行点。

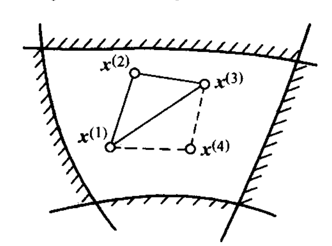


图 9.7-10　二维问题的复合形

有时也可能沿最坏点与中心点的连线方向找不到一个较

好的可行的映射点 $x^{(R)}$，即满足 $f(x^{(R)}) < f(x^{(H)})$ 的可行点，遇有这种情况时，可以改用次坏点 $x^{(G)}$ 进行映射，从而改变了搜索方向。

如上所述，首先沿最坏点 $x^{(H)}$ 的映射方向选取映射点 $x^{(R)}$，即

$$x^{(R)} = x^{(S)} + \alpha(x^{(S)} - x^{(H)}) \tag{9.7-47}$$

式中 α 称为映射系数，一般 $\alpha > 1$。如果 $x^{(R)}$ 满足所有约束条件，且 $f(x^{(R)}) < f(x^{(H)})$，即可用 $x^{(R)}$ 代替 $x^{(H)}$ 组成新复合形，完成一次迭代。如果 $x^{(R)}$ 不满足约束条件，或不满足 $f(x^{(R)}) < f(x^{(H)})$，则将映射系数 α 减半重新计算 $x^{(R)}$，若仍不满足要求，可继续将 α 减半，直到 α 减到很小，例如小于 10^{-5}，还不满足要求时，那就放弃这一方向，改用次坏点 $x^{(G)}$ 的映射方向。

由于复合形不必保持规则形状，为了适应各种非线性函数的特点，以便能更有利地选取新顶点，所以有时需要变化复合形的形状。为此，可以采取各种灵活的变形措施。

若初次确定的映射点 $x^{(R)}$，其目标函数值比最好点 $x^{(L)}$ 的还小，即 $f(x^{(R)}) < f(x^{(L)})$ 时，说明沿此方向映射的效果显著，有进一步扩张的必要，以探求更好的点。即按下式计算新点

$$x^{(E)} = x^{(S)} + \beta(x^{(R)} - x^{(S)}) \tag{9.7-48}$$

式中，β 为扩张系数，一般 $\beta > 1$。

如果 $f(x^{(E)}) < f(x^{(R)})$，则说明扩张成功，取 $x^{(E)}$ 替换 $x^{(H)}$ 组成新复合形，完成本次迭代。如果 $f(x^{(E)}) > f(x^{(R)})$，则扩张失败，仍取原映射点 $x^{(R)}$ 替换 $x^{(H)}$ 组成新复合形。

若在中心点 $x^{(S)}$ 以外已找不到好的映射点，还可以到中心点 $x^{(S)}$ 以内寻找，即向 $x^{(S)}$ 以内收缩，按下式计算收缩点 $x^{(K)}$

$$x^{(K)} = x^{(S)} - \gamma(x^{(S)} - x^{(H)}) \tag{9.7-49}$$

式中，γ 为收缩系数，一般 $0 < \gamma < 1$。与扩张同样，如果 $f(x^{(K)}) < f(x^{(R)}) < f(x^{(H)})$ 则收缩成功，取 $x^{(K)}$ 替换 $x^{(H)}$，否则失败。

若采取上述措施均无效，还可以采取向最好点 $x^{(L)}$ 靠拢的措施，即

$$x^{(G)} = x^{(L)} - 0.5(x^{(L)} - x^{(G)}) \tag{9.7-50}$$

$$x^{(H)} = x^{(L)} - 0.5(x^{(L)} - x^{(H)}) \tag{9.7-51}$$

各顶点向最好点靠拢后再重新寻求新顶点。

反复执行上述迭代过程，复合形逐渐变小且向最优点逼近，直到满足

$$\left\{\frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}[f(x^{(j)}) - f(x^{(C)})]^2\right\}^{1/2} \leqslant \varepsilon \tag{9.7-52}$$

时迭代计算可以结束。此时复合形中目标函数值最小的顶点即为最优解。

式 (9.7-52) 中的 $x^{(C)}$ 为复合形顶点点集的中心，即

$$x_i^{(C)} = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} x_i^{(j)} \quad i = 1,2,\cdots,n \tag{9.7-53}$$

4.2 有约束优化问题的间接解法

4.2.1 有约束优化问题间接解法的基本思想

约束优化设计问题的间接求解方法，是一类常用的有效方法。这种方法适用于求解具有不等式约束条件和等式约束条件的优化设计问题。其基本思想，是将一个有约束的问题转化为一个或一系列无约束的问题来求解。

如前所述，约束优化设计问题的数学模型一般可表达为

$$\begin{aligned} &\min f(x) \qquad x \in R^n \\ &\text{s.t.}\ g_u(x) \leqslant 0 \quad u = 1, 2, \cdots, m \\ &\qquad h_v(x) = 0 \quad v = 1, 2, \cdots, p < n \end{aligned}$$

为了将它转化为无约束问题求解，需要引入一个新的目标函数，即

$$\min\Phi(x, r_1, r_2) = \min\left\{f(x) + r_1\sum_{u=1}^{m} G[g_u(x)] + r_2\sum_{v=1}^{p} H[h_v(x)]\right\}, x \in R^n \tag{9.7-54}$$

式中，$\Phi(x, r_1, r_2)$ 为约束问题转换后的新目标函数；r_1，r_2 为两个不同的加权参数或加权因子；$G[g_u(x)]$，$H[h_v(x)]$ 分别为由约束函数 $g_u(x)$，$h_v(x)$ 所定义的某种形式的泛函数。

由于在新目标函数中包括了各种约束条件，因而在求它的极值过程中不断调整设计点使它满足约束条件，最终找到原问题的约束最优解。

有约束优化问题的间接解法主要有惩罚函数法、消元法和拉格朗日乘子法等。

惩罚函数法又称为无约束极小化技术（Sequential Unconstrained Minimization Technique，SUMT），是一种将有约束优化问题转化为一系列无约束优化问题的间接法。其基本思想是将有约束优化问题中的目标函数加上反映全部约束函数的对应项（惩罚项），构成无约束的新目标函数，即惩罚函数。根据惩罚函数构造方法不同，又可分为内点惩罚函数法、外点惩罚函数法和混合惩罚函数法。

内点惩罚函数法中，惩罚函数定义在可行域内部，逐步逼近原有约束优化问题的最优解。该方法要求初始点在可行域内，且迭代过程中任一解总是可行解。这种方法不适用于等式约束。

外点惩罚函数法中，惩罚函数可以定义在可行域的外部，逐渐逼近原有约束优化问题的最优解。该方法允许初始点不在可行域内，可用于含等式约束的有约束优化问题。但迭代过程中的点不在可行域内，只有迭代过程完成才收敛于最优解。

混合惩罚函数法是一种综合外点、内点惩罚函数法优点的方法。其基本思想是不等式约束条件中满足约束条件的部分用内点惩罚函数法，不满足约束条件的部分用外点惩罚函数法，从而构造出混合惩罚函数。该方法可任选初始点，并可处理多个变量及多个函数，适用于具有等式约束条件和不等式约束条件的优化问题。但在一维搜索上耗时较多。

消元法的基本思想是利用等式约束条件消去某些设计变量，把等式约束优化问题转化为无约束优化问题，把一个求具有 p 个等式约束的 n 个变量的优化问题，改变成为仅有 $(n-p)$ 个独立变量的无约束优化问题。因此，消元法如果能用的话，当然是非常简便、有效的。但当等式约束方程组为多维高次非线性方程组时，要实现消元过程是相当困难的，有时甚至是不可行的。

拉格朗日乘子法的基本思想是通过引入一个特定系数即拉格朗日乘子，构成一个新的无约束条件的目标函数，将有约束优化问题转换为无约束优化问题，而使数学变换过程简单化。新目标函数的无约束最优解，就是原目标函数的约束最优解。该方法在求解等式约束方程为多维高次非线性方程时非常简便、有效。

这里，主要介绍有约束优化问题间接解法中最常用的惩罚函数法。用惩罚函数法求解式 (9.7-54) 时，需要不断调整加权参数 $r_1^{(k)}$ 和 $r_2^{(k)}$ $(k=0, 1, 2\cdots)$，使其新目标函数 $\Phi(x, r_1^{(k)}, r_2^{(k)})$ 极小点的序列 $x^*(r_1^{(k)}, r_2^{(k)})$ $(k=0, 1, 2, \cdots)$ 逐渐收敛到原目标函数 $f(x)$ 的约束最优解上。因此，要求满足三个极限性质，即



$$\lim_{k\to\infty} r_1^{(k)} \sum_{u=1}^{m} G[g_u(\boldsymbol{x})] = 0$$

$$\lim_{k\to\infty} r_2^{(k)} \sum_{v=1}^{p} H[h_v(\boldsymbol{x})] = 0$$

$$\lim_{k\to\infty} | \Phi(\boldsymbol{x}^{(k)}, r_1^{(k)}, r_2^{(k)}) - f(\boldsymbol{x}^{(k)}) | = 0$$

另外，在求函数 Φ（$\boldsymbol{x}$，$r_1^{(k)}$，$r_2^{(k)}$）的极小化过程中，当设计点 $\boldsymbol{x}$ 不满足约束条件时，使 $r_1^{(k)}\sum_{u=1}^{m}G[g_u(\boldsymbol{x})]$ 项和 $r_2^{(k)}\sum_{v=1}^{p}H[h_v(\boldsymbol{x})]$ 项的函数值增大，这样就对函数 Φ（$\boldsymbol{x}$，$r_1^{(k)}$，$r_2^{(k)}$）给予"惩罚"。因此，称新目标函数 Φ（$\boldsymbol{x}$，$r_1^{(k)}$，$r_2^{(k)}$）为惩罚函数或增广函数，而 $r_1\sum_{u=1}^{m}G[g_u(\boldsymbol{x})]$ 和 $r_2\sum_{v=1}^{p}H[h_v(\boldsymbol{x})]$ 称为惩罚项。而 $r_1^{(k)}$ 和 $r_2^{(k)}$ 为对不等式约束与等式约束复合函数的惩罚因子。

4.2.2 内点惩罚函数法

惩罚函数法以不同的加权参数来构造一序列无约束的新目标函数，求这一序列惩罚函数的无约束极值点 $\boldsymbol{x}^*(r^{(k)})$，使它逐渐逼近原约束问题的最优解。而且，不论原约束问题的最优解在可行域内还是在可行域边界上，其整个搜索过程都在约束区域内进行。

对于满足于 g_u（$\boldsymbol{x}$）$\leqslant 0$（$u=1$，2，…，m）的优化问题，其惩罚函数可取

$$\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}, r^{(k)}) = f(\boldsymbol{x}) - r^{(k)} \sum_{u=1}^{m} \frac{1}{g_u(\boldsymbol{x})} \quad (9.7\text{-}55)$$

或

$$\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}, r^{(k)}) = f(\boldsymbol{x}) - r^{(k)} \sum_{u=1}^{m} \ln(-g_u(\boldsymbol{x})) \quad (9.7\text{-}56)$$

对于满足 g_u（$\boldsymbol{x}$）$\geqslant 0$（$u=1$，2，…，m）的优化设计问题，其惩罚函数取

$$\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}, r^{(k)}) = f(\boldsymbol{x}) + r^{(k)} \sum_{u=1}^{m} \frac{1}{g_u(\boldsymbol{x})} \quad (9.7\text{-}57)$$

或

$$\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}, r^{(k)}) = f(\boldsymbol{x}) - r^{(k)} \sum_{u=1}^{m} \ln(g_u(\boldsymbol{x})) \quad (9.7\text{-}58)$$

式中，$r^{(k)}$ 为惩罚因子，它满足如下关系

$$r_1^{(0)} > r^{(1)} > r^{(2)} > \cdots \text{和} \lim_{k\to\infty} r^{(k)} \to 0 \quad (9.7\text{-}59)$$

当设计点趋向于边界时，由于不等式约束函数趋近于零，其惩罚项的函数值就陡然增加并趋近于无穷大，使迭代点始终保持在可行区域内。因此，只有当惩罚因子 $r^{(k)}$ 趋近于零时，才能求得约束边界上的约束最优点 $\boldsymbol{x}^*$。

内点惩罚函数的计算是从可行区域内的某一个初始点 $\boldsymbol{x}^{(0)}$ 开始，再选取适当的初始值 $r^{(0)}$，求出惩罚函数 $\boldsymbol{\phi}$（$\boldsymbol{x}$，$r^{(0)}$）的最优点 $\boldsymbol{x}^*$（$r^{(0)}$）。然后将它作为下一次求无约束极值的初始点，并把 $r^{(0)}$ 减至 $r^{(1)}$，再求 $\boldsymbol{\phi}$（$\boldsymbol{x}$，$r^{(1)}$）的最优点 $\boldsymbol{x}^*$（$r^{(1)}$），如此继续下去，直至 $\boldsymbol{x}^*$（$r^{(k)}$）收敛于原约束问题的最优点 $\boldsymbol{x}^*$。其具体算法如下。

1）选取初始点 $\boldsymbol{x}^{(0)}$，此点应满足 g_u（$\boldsymbol{x}$）<0（$u=1$，2，…，m），但不应在边界上。

2）选取适当的惩罚因子初始值 $r^{(0)}$、降低系数 c、计算精度 ε_1 和 ε_2，并令 $k=0$。

3）构造惩罚函数，调用无约束优化方法，求 $\min\boldsymbol{\phi}$（$\boldsymbol{x}$，$r^{(k)}$），得最优点 $\boldsymbol{x}^*$（$r^{(k)}$）。

4）检验精度

$$\| \boldsymbol{x}^*(r^{(k-1)}) - \boldsymbol{x}^*(r^{(k)}) \| \leqslant \varepsilon_1, \text{和}$$

$$\left| \frac{\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}^*(r^{(k)}) - \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}^*(r^{(k-1)}))}{\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}^*(r^{(k-1)}))} \right| \leqslant \varepsilon_2$$

若不等式成立，则认为已求得最优点 $\boldsymbol{x}^* \approx \boldsymbol{x}^*$（$r^{(k)}$）；若不成立，则转下步。

5）计算 $r^{(k+1)}=cr^{(k)}$；并令 $\boldsymbol{x}^{(0)}=\boldsymbol{x}^*$（$r^{(k)}$），$k=k+1$ 后转向第 3 步。

4.2.3 外点惩罚函数法

内点法是将惩罚函数定义于可行域内，而外点法与内点法不同，是将惩罚项函数定义于可行区域的外部。

外点惩罚函数的一般形式为，对于受约束 g_u（$\boldsymbol{x}$）$\leqslant 0$（$u=1$，2，…，m）取

$$\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}, r^{(k)}) = f(\boldsymbol{x}) + r^{(k)} \sum_{u=1}^{m} \{\max[g_u(\boldsymbol{x}), 0]\}^z \quad (9.7\text{-}60)$$

大括号内表示

$$\max[g_u(\boldsymbol{x}), 0] = \begin{cases} g_u(\boldsymbol{x}) & (\text{当 } \boldsymbol{x} \text{ 在可行域外，即 } g_u(\boldsymbol{x}) > 0 \text{ 时}) \\ 0 & (\text{当 } \boldsymbol{x} \text{ 在可行域内，即 } g_u(\boldsymbol{x}) \leqslant 0 \text{ 时}) \end{cases} \quad (9.7\text{-}61)$$

这就保证了在可行域内 $\boldsymbol{\phi}$（$\boldsymbol{x}$，$r^{(k)}$）与 f（$\boldsymbol{x}$）是等价的，即

$$\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}r^{(k)}) = \begin{cases} f(\boldsymbol{x}) + r^{(k)} \sum_{u\in I_1} [g_u(\boldsymbol{x})]^z & (\text{点 } \boldsymbol{x} \text{ 在可行域外}) \\ f(\boldsymbol{x}) & (\text{点 } \boldsymbol{x} \text{ 在可行域内}) \end{cases}$$

式中，z 为构造惩罚函数的指数，一般取 $z=2$；I_1 为违反约束条件的集合，即

$$I_1 = \{u | g_u(\boldsymbol{x}) > 0 \quad u=1, 2, \cdots, m\} \quad (9.7\text{-}62)$$

$r^{(k)}$ 为惩罚项的惩罚因子。惩罚因子是一个递增的序列，即且

$$0 < r^{(0)} < r^{(1)} < \cdots < r^{(k)}$$

$$\lim_{k\to\infty} r^{(k)} = \infty$$

现在来考虑惩罚函数 $\boldsymbol{\phi}$（$\boldsymbol{x}$，$r^{(k)}$）的无约束极小点是否收敛到原目标函数 f（$\boldsymbol{x}$）的约束极小点的问题。当 $\boldsymbol{x}$ 点在可行区域内时，不管 $r>0$ 取何值，惩罚项总为零，因此，惩罚函数 $\boldsymbol{\phi}$（$\boldsymbol{x}$，$r^{(k)}$）的极小点 $\boldsymbol{x}^*$（$r^{(k)}$）如果在可行域内，则该点必为原问题的最优解 $\boldsymbol{x}^*$，即

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}, r^{(k)}) &= f(\boldsymbol{x}) + r^{(k)} \sum_{u=1}^{m} [\max(0, g_u(\boldsymbol{x})]^z \\ &\geqslant \boldsymbol{\phi}[\boldsymbol{x}^*(r^{(k)}), r^{(k)}] \\ &= f(\boldsymbol{x}^*(r^{(k)})) + r^{(k)} \sum_{u=1}^{m} [\max(0, g_u(x^* r^{(k)}))]^z \\ &= f(\boldsymbol{x}^*(r^{(k)})) = f(\boldsymbol{x}^*) \end{aligned}$$

这是因为当 $\boldsymbol{x}$ 点在可行区域内时

$$r^{(k)} \sum_{u=1}^{m} [\max(0, g_u(\boldsymbol{x}))]^z = 0,$$

$$\text{所以 } \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}^*(r^{(k)}), r^{(k)}) = f(\boldsymbol{x}^*(r^{(k)}))$$

这就说明了 $\boldsymbol{x}^*$（$r^{(k)}$）为原问题的最优解。

另一种情况，当惩罚函数 $\boldsymbol{\phi}$（$\boldsymbol{x}$，$r^{(k)}$）的无约束极小点 x^*（$r^{(k)}$）在可行域外，此时有

$$0 < r^{(k)} \sum_{u=1}^{m} [\max(0, g_u(x^* r^{(k)}))]^z < \infty$$

这说明 $\boldsymbol{x}^*$（$r^{(k)}$）不可能是原问题的约束最优解。很明显，它不是原问题的约束最优点，当 $r^{(k)}$ 取值增大时，极小点 $\boldsymbol{x}^*(r^{(k)})$ 逐渐向可行域边界逼近，当 $r^{(k)}$ 值达到足够大时，$\boldsymbol{x}^*(r^{(k)})$ 就是原问题最优点 x^* 的近似解。这是因为当 $r^{(k)}$ 趋近于无穷大时

$$\sum_{u\in I_1} [g_u(\boldsymbol{x})]^z = \frac{1}{r^{(k)}} [\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}^*(r^{(k)}), r^{(k)}) - f(\boldsymbol{x}^*)] \to 0$$

这就说明函数 $\boldsymbol{\phi}$（$\boldsymbol{x}$，$r^{(k)}$）的最优解 $\boldsymbol{x}^*$（$r^{(k)}$）已处于适时约束的约束面上。实际上，随着惩罚因子值的增加，迫使



$$r^{(k)}\sum[g_u(x)]^2$$

项的值逐渐减小，直至到约束面上时，其值为零，故又称它为衰减函数。可见，外点惩罚函数 ϕ（x，$r^{(k)}$）的极小点 $x^*(r^{(k)})$是在可行域外以 $r^{(k)}$ 为参数的函数，将从可行域外侧逐渐向约束边界运动，最后趋近于原问题的约束最优解 x^*。外点惩罚函数法也就由此而得名。

在外点法中，惩罚因子 $r^{(k)}$ 通常是按下面递推公式增加的，

$$r^{(k)} = \alpha r^{(k-1)} \tag{9.7-63}$$

式中，α 为递增系数，一般 $\alpha = 5 \sim 10$。

外点法的算法步骤如下：

1）选择一个适当的 $r^{(0)}$ 值和初始点 $x^{(0)}$，规定收敛精度 ε_1、ε_2。令 $k=0$

2）求惩罚函数的无约束极值点 x^*（$r^{(k)}$），即

$$\min_{x\sim R^n}\phi(x,r^{(k)}) = f(x) + r^{(k)}\sum_{u\in I_1}\{\max[g_u(x),0]\}^2$$

3）计算$x^*(r^{(k)})$点违反约束的情况

$$Q = \max_{u\in I_1}\{g_u[x^*(r^{(k)})]\}，当 g_u(x)\leqslant 0 时$$

4）若 $Q\leqslant\delta_0$，则$x^*(r^{(k)})$点已接近约束边界，停止迭代。否则，转入下一步。

5）若 $\| x^*(r^{(k-1)}) - x^*(r^{(k)})\| \leqslant \varepsilon_1$ 和 $\left|\dfrac{\phi(x^*(r^{(k-1)})) - \phi(x^*(r^{(k)}))}{\phi(x^*(r^{(k-1)}))}\right| \leqslant \varepsilon_2$，则停止迭代；否则取

$$r^{(k+1)} = \alpha r^{(k)},\quad x^{(0)} = x^*(r^{(k)}),\quad k = k+1$$

转向第 2 步。

4.2.4 混合惩罚函数法

由于内点法容易处理不等式约束优化设计问题，而外点法又容易处理等式约束优化设计问题，因而可将内点法与外点法结合起来，处理同时具有等式约束和不等式约束的优化设计问题。

设求

$$\begin{aligned} &\min\ f(x) \quad x\in R^n \\ \text{s.t.}\ &g_u(x)\leqslant 0 \quad u=1,2,\cdots,m \\ &h_v(x) = 0 \quad v=1,2,\cdots,p,\ p<n \end{aligned}$$

问题的最优解。在构造惩罚函数时，将惩罚因子统一用 $r^{(k)}$ 表示，得

$$\phi(x,r^{(k)}) = f(x) - r^{(k)}\sum_{u=1}^{m}\frac{1}{g_u(x)} + (r^{(k)})^{-1/2}\sum_{v=1}^{p}[h_v(x)]^2 \tag{9.7-64}$$

式中，$r^{(0)} > r^{(1)} > \cdots,\ r^{(k)},\ \lim\limits_{k\to\infty} r^{(k)} = 0$

有时也可以这样处理，对于设计点 x，不满足的等式约束和不等式约束都用外点法，而对于 x 满足的不等式约束用内点法，即

$$\phi(x,r^{(k)}) = f(x) + r^{(k)}\sum_{u\in I_1}\frac{1}{g_u(x)} + \frac{1}{r^{(k)}}\left\{\sum_{u\in I_2}[g_u(x)]^2\right\} + \frac{1}{r^{(k)}}\sum_{v=1}^{p}[h_v(x)]^2 \tag{9.7-65}$$

式中，$I_1 = \{u\,|\,g_u(x)\leqslant 0\quad u=1,2,\cdots,m\}$

$I_2 = \{u\,|\,g_u(x) > 0\quad u=1,2,\cdots,m\}$

$r^{(0)} > r^{(1)} > r^{(2)} > \cdots > r^{(k)},\ > \lim\limits_{k\to\infty} r^{(k)} > 0$

这种同时处理等式和不等式约束的惩罚函数法称为混合惩罚函数法。混合惩罚函数法与前述内点法和外点法一样，也属于序列无约束极小化（SUMT）方法中的一种方法。若是用式（9.7-64），则其初始点 $x^{(0)}$ 应为内点，惩罚因子初始值 $r^{(0)}$ 可参考内点法选取。若是采用式（9.7-65），则其初始点 $x^{(0)}$ 可以任意选择，而 $r^{(0)}$ 值可参考外点法选取。由于式（9.7-64）这种内点和外点混合的方法具有内点惩罚函数的求解特点，所以它是一种应用较普遍的方法。

若是用式（9.7-64）的混合惩罚函数法，则其计算步骤与内点惩罚函数法相类似：

1）先在可行域内选择一个严格满足所有不等式约束的初始点 $x^{(0)}$。选择适当的惩罚因子初始值 $r^{(0)}$，为了简化可取 $r^{(0)} = 1$ 试算。

2）求 $\min\phi$（x，$r^{(k)}$），得$x^*(r^{(k)})$。

3）如$x^*(r^{(k)})$和 $\phi(x^*(r^{(k)}),r^{(k)})$满足收敛精度，则停止迭代，否则转入下一步。

4）取 $r^{(k+1)} = cr^{(k)}$，$x^0 = x^*(r^{(k)})$，转向第 2 步。

5 组合挤压凹模的优化设计

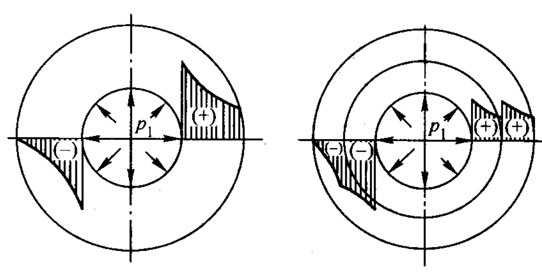
组合凹模的优化设计在挤压模具 CAD 中占有很重要的位置。通常采用的一种优化方法是以 Lame 公式为基础的常规优化方法；另一种优化主法是把有限元分析与优化计算相结合的综合优化方法。这种新的优化方法有利于提高优化精度，使模具设计更趋合理。

组合凹模优化设计就是要选择组合凹模的最佳直径比、各层直径和它们之间的过盈量，目的是保证模具在最大压力作用下具有足够的强度。

5.1 组合凹模的类型和受力特点

通常，作用于冷挤压凹模内壁的压力是很高的，特别是在挤压黑色金属时，单位压力有时高达 2 000 MPa 以上。整体凹模难以承受这样高的压力，所以通常采用带预紧圈的组合凹模来提高它的承压能力。

图 9.7-11 为整体式凹模内的工作应力的分布，图 b 为双层组合凹模内的真实应力分布情况。从图中可以看出，由过盈配合产生的预应力，改善了凹模内部的应力分布，大大降低了凹模内壁危险面上的切向拉应力的数值，因而使凹模的承载能力得到提高。



(a) 整体凹模内的应力分布　　(b) 组合凹模内的应力分布

图 9.7-11 凹模内的应力分布

常规的以 Lame 公式为依据的组合凹模优化方法，把凹模视作均匀受压的厚壁筒，按照凹模各圈材料同时达到屈服点的条件，计算出凹模的最佳径比、各圈的直径及过盈量。这种常规优化方法虽然比较简单，即使不使用计算机也能进行计算，但是它有明显的不足之处：

1）挤压凹模不是无限长圆筒体，两端也没有封闭，因此把它视作厚壁筒是一种很大的近似。

2）作用于凹模内壁的压力分布是不均匀的，并且只作用于凹模的局部高度上，这与均匀压力作用下的厚壁圆筒是明显不同的。

由于作用于凹模的内压力分布方式比较复杂，不同的简化方式会直接影响到组合凹模的优化精度和实际效果。对局部均布压力作用下的组合凹模内的应力分布的研究结果表明，局部内压力作用方式下的凹模内的应力分布与按照 Lame 公式计算的结果有明显的差异。

为了确保优化设计的效果，近年来人们发展了一种新的优化方法，即有限元优化方法。

5.2　组合凹模的有限元优化方法

5.2.1　单层凹模承受局部内压力时应力和位移的有限元分析

冷挤压模的受力多属于轴对称问题，因此可以采用轴对称弹性有限元方法进行应力和位移的计算。在划分单元时，采用四边形八结点等参单元较三角形单元计算精度高。

图 9.7-12 所示为整体式凹模的单元网格划分图，其边界约束条件规定模底平面的纵向位移为零。载荷作用方式设为作用于凹模内壁的部分高度上的压力均匀分布，其作用位置和作用高度是可以调节的。计算中把作用的均布载荷用等效结点力方式转移到相关结点上。变化载荷作用区间的长度和位置，就可以模拟各种受力状态下的挤压过程，计算出凹模内的应力和位移的分布。

单层凹模的有限元分析程序结构框图示于图 9.7-13。

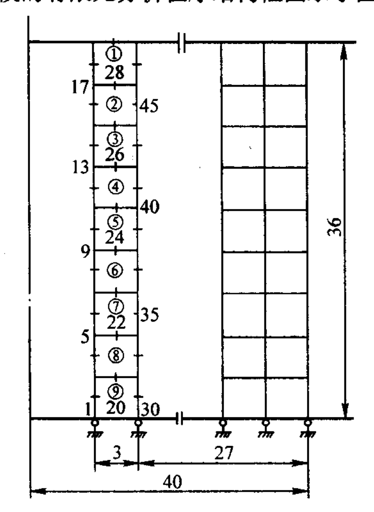


图 9.7-12　单层凹模网格划分图



图 9.7-13　有限元分析程序框图

图 9.7-14 所示为凹模内壁的主应力差（$\sigma_t-\sigma_r$）与内压力 p_0 作用区间的关系。直线 1 为内压力作用于全高，曲线 2 表示内压力 p_0 的作用区间为④、⑤、⑥三个单元（参见图 9.7-12），曲线 3 表示内压力的作用区间为③、④、⑤、⑥四个单元，曲线 4 表示内压力作用区间为②、③、④、⑤、⑥五个单元，虚线 5 为按 Lame 公式计算的结果。从图中可以看出，当内压力作用于凹模内壁的局部高度上时，各点的主应力差值（$\sigma_t-\sigma_r$）明显小于按照 Lame 公式的计算结果。因此，按照 Lame 公式和屈服条件设计的凹模没有使凹模的实际承载能力得到充分发挥。

5.2.2　组合凹模的有限元优化设计

用电测法和光弹性法测试的结果表明，挤压时作用于凹模内壁的压力是非均匀分布的，在挤压毛坯与凹模内壁接触处，凹模的受力为三向应力状态。按照厚壁圆筒的理论计算凹模的工作应力会产生较大的误差。但是，把挤压毛坯与凹模相接触的一段区间假设为均布压力而作为有限元计算的边界条件，可以使计算大为简化。尽管这种简化与凹模的实际受力情况仍然存在着一定的差异，但是考虑到挤压中各种偶然因素的影响和模具的安全性，在进行有限元计算时，仍然可以用局部均布载荷来代替作用于这一高度上的局部非均布载荷。对于由预紧力产生的预应力的计算，由于组合凹模的各圈之间沿凹模高度存在着相同的过盈量而产生均匀的预紧压力，因此可以用 Lame 公式来计算。

在对组合凹模的工作应力进行有限元计算时，凹模各圈的弹性模量和泊松比都近似相等，可以把组合凹模当作连续体进行有限元应力场计算。在划分网格时，为了使元素结点坐标随各圈直径的变化而变化，可预先规定每层的径向结点数，然后由计算机自动划分网格。组合凹模单元网格划分如图 9.7-15 所示，图中 r_0、r_1、r_2 和 r_3 分别为凹模的内、中、外各圈的内径和外径，p_0 为内压力，h' 为挤压毛坯离凹模端面的距离。

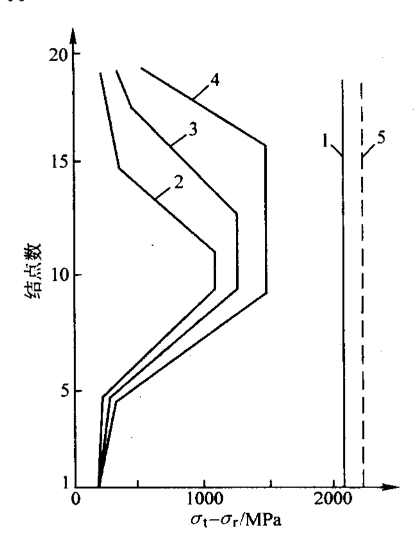


图 9.7-14　凹模内壁主应力差（$\sigma_t-\sigma_r$）与内压力作用高度的关系

组合凹模的优化设计的指导原则是，按照第三强度理论，当凹模内壁承受最大工作内压力时，凹模内圈及各预紧圈危险面上的切应力正好达到材料的许用应力之半，可以用公式表示为：

$$\tau_{max}=\frac{1}{2}[\sigma] \text{ 或 } (\sigma_t-\sigma_r)=[\sigma]$$

设 F_{xx} 为组合凹模各层内壁上的主应力差与其许用应力的相对误差所允许的最大值，当 F_{xx} 达到预先给定的某一精

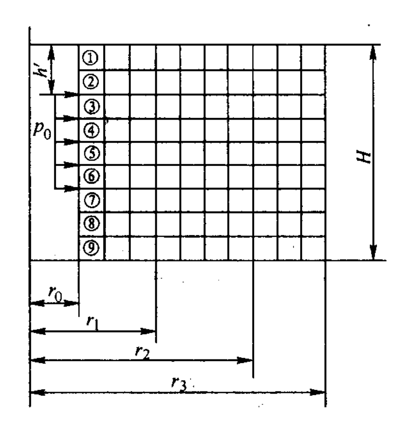


图 9.7-15 组合凹模单元网格的划分

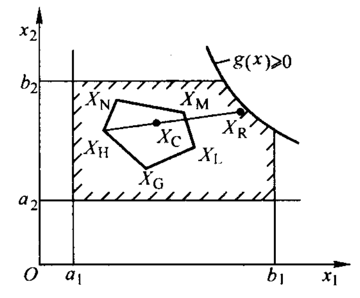


图 9.7-16 复合形法示意图

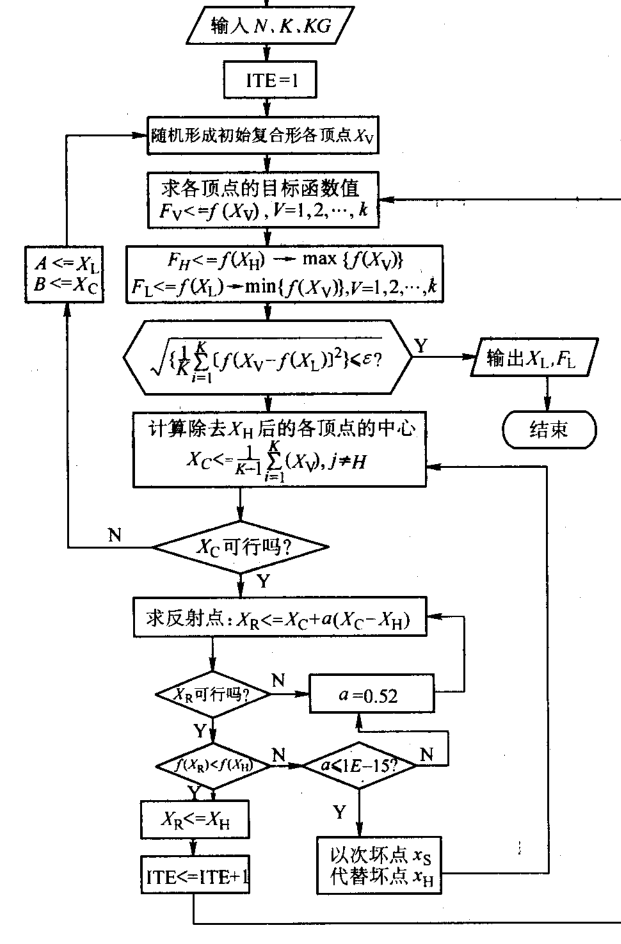


图 9.7-17 复合形法计算框图

度值 ε 时，优化即告结束。设计变量为：中圈内径 r_1，外圈内径 r_2，外圈外径 r_3 以及内圈与中圈之间的过盈量 Δr_{12}，中圈与外圈之间的过盈量 Δr_{23}。

优化设计的方法很多，要选择适合于问题求解的方法，就要认真考虑所规定的目标函数和约束条件。这里，选用复合形法比较有利，它不必计算目标函数的梯度及二阶导数矩阵，程序比较简单。优化计算过程是：在可行域内选取 K 个设计点作为初始复合形的顶点，通常取 $N+1<K<2N$，N 为设计变量数。计算并比较这些顶点的目标函数之值，以反射点代替坏点，构成新的复合形。以此步骤重复多次，使复合形的位置越来越靠近最优点，最后以复合形中目标函数值最小的点作为近似最优解。图 9.7-16 为复合形法示意图，有影线区域为设计可行域，择优过程在该域内进行。设在由 $X_G X_H X_L X_M X_N$ 构成的初始复合形中，X_H 为最大函数值的对应点，并定义为坏点；X_C 是除坏点以外的各点的中心；X_R 为坏点 X_H 的反射点。以 X_R 代替 X_H 构成新的复合形，重复上述步骤，直到满足收敛条件为止。

图9.7-17 为复合形法计算框图，其中主要标识符为：N——设计变量个数；K——复合形顶点个数；KG——不等约束数；ITE——迭代次数。图 9.7-18 为有限元优化设计程序的计算框图。

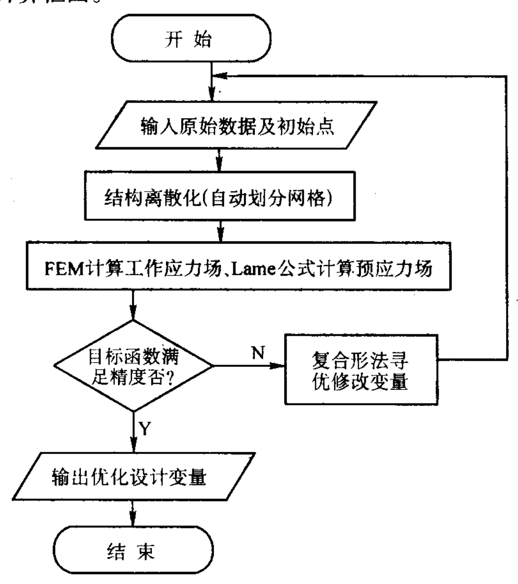


图 9.7-18 有限元综合优化计算框图

对组合凹模优化的计算结果表明：

1）当内压力作用于凹模全高时，其结果与常规优化结果基本吻合。

2）局部均匀内压力作用下的凹模进行优化所得凹模的外径明显小于常规优化结果。

3）一般情况下，凹模内圈与中圈之间的过盈量 Δr_{12} 约为 Δr_{23} 的 2 倍。

4）当内压力作用区间的长度一定时，其位置的改变对凹模各中径尺寸、过盈量等参数的优化结果影响不大。但是，当内压力作用区间的长度变化时，则对各优化参数的影响比较大。

5）对于凹模承受非均布内压力作用的方式，可以把分布压力简化为几段折线的形式，再按照将分布力转化为结点力的方法进行优化计算。

6）对于只有一层预紧圈的双层组合凹模，可以令有关参数为零，亦可用上述方法进行优化。

6 预成形模具形状的优化设计

在金属塑性成形生产中，产品的质量主要取决于模具设

计的水平。金属塑性成形过程通常为非稳态大变形问题，因其成形件形状的复杂性，绝大多数成形件采用多工序加工，工序数目的确定和各工序模具形状的设计是材料成形工艺与模具设计的主要工作。图 9.7-19 所示为一锻造过程，为获得所要求的终锻件，必须经过中间的预锻工步，如何设计预锻件形状和加工此预锻件所用预锻模具的形状是生产合格终锻件的关键，也是模具设计的困难问题之一。在实际生产中，设计者的经验和直觉一直是预成形设计的主要依据，其设计水平、时间和成本都受到一定的限制。

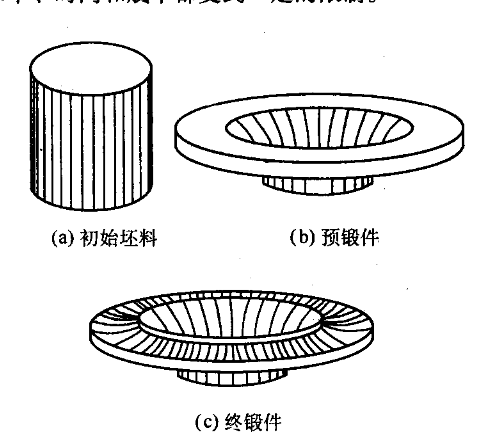


图 9.7-19 典型多工序锻造过程

近年来，人们提出了一种基于刚（黏）塑性有限元数值模拟技术的灵敏度分析方法，并建立了相应的预成形模具形状优化设计方法与步骤。该方法以直接设计预成形模具形状为目标，应用有限元、优化和正向模拟技术相结合的方法建立灵敏度分析理论和模具形状优化设计方法。

6.1 刚（黏）塑性有限元基本方程

对于金属塑性成形问题，经有限元离散化后，单元应变率可用下列矩阵形式表示：

$$\dot{\varepsilon} = \boldsymbol{BV} \tag{9.7-66}$$

式中，$\boldsymbol{B}$ 为单元应变率矩阵；$\boldsymbol{V}$ 为单元的结点速度向量。

对于四边形四节点等参单元，单元应变率矩阵 $\boldsymbol{B}$ 可表示为

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} E_1 & 0 & E_2 & 0 & E_3 & 0 & E_4 & 0 \\ 0 & H_1 & 0 & H_2 & 0 & H_3 & 0 & H_4 \\ P_1 & 0 & P_2 & 0 & P_3 & 0 & P_4 & 0 \\ H_1 & E_1 & H_2 & E_2 & H_3 & E_3 & H_4 & E_4 \end{bmatrix} \tag{9.7-67}$$

式中，$E_\alpha = \partial N_\alpha / \partial x$，$H_\alpha = \partial N_\alpha / \partial y$，（$\alpha = 1, 2, 3, 4$）；$N_\alpha$ 为单元形状函数；x，y 为单元内任意点的坐标。

对于平面变形问题，式（9.7-68）中的 P_α（$\alpha = 1, 2, 3, 4$）等于零，对于轴对称变形问题，$P_\alpha = N_\alpha / r$，r 为径向坐标，并表示为

$$r = \sum_{\alpha=1}^{4} N_\alpha x_\alpha \tag{9.7-68}$$

式中，x_α（$\alpha = 1, 2, 3, 4$）为单元四个结点的径向（横向）坐标。

刚（黏）塑性材料成形问题的有限元平衡方程式可写为

$$\boldsymbol{K}(\boldsymbol{V},\boldsymbol{X})\boldsymbol{V} + \boldsymbol{F}(\boldsymbol{V},\boldsymbol{X}) = 0 \tag{9.7-69}$$

其中，

$$K_{ij}(\boldsymbol{V},\boldsymbol{X}) = \int_V \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\varepsilon}}} P_{ij} \mathrm{d}V + Q\int_V C_i C_j \mathrm{d}V \tag{9.7-70}$$

$$F_i(\boldsymbol{V},\boldsymbol{X}) = \int_{S_C} mk \frac{2}{\pi} N_i \arctan\left(\frac{N_j v_{S_j}}{u_0}\right) \mathrm{d}S \tag{9.7-71}$$

式中，$\boldsymbol{K}$ 为与材料和过程有关的非线性刚度矩阵；$\boldsymbol{F}$ 为施加的结点力向量；$\boldsymbol{X}$ 为单元的结点坐标向量；$\boldsymbol{Q}$ 为引入塑性变形体积不变条件的惩罚因子；$\bar{\sigma}$ 为等效应力；$\dot{\bar{\varepsilon}}$ 为等效应变率；m 为常摩擦因子；k 为剪切屈服应力。

工件与模具接触面上的摩擦力用相对滑动速度的反正切函数表示，设 v_{sj} 为模具与工件接触面上节点 j 的相对滑动速度，则滑动速度 v_s 可采用线性插值求得：

$$v_s = \sum_{j=1}^{2} N_j v_{sj} \tag{9.7-72}$$

矩阵 $\boldsymbol{P}$ 与 $\boldsymbol{C}$ 可由应变率矩阵 $\boldsymbol{B}$ 构造，

$$P_{ij} = B_{ik} D_{kn} B_{nj}$$
$$C_i = B_{1i} + B_{2i} + B_{3i}$$
$$C_j = B_{1j} + B_{2j} + B_{3j}$$

其中 $$D = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

对于材料成形问题，平衡方程式（9.7-69）为一非线性方程组，其求解过程为：首先计算各单元的刚度阵和节点力向量；然后在整个工件上进行组装，形成刚度方程组；最后进行线性化，并采用 Newton-Raphson 迭代方法进行求解。

6.2 设计变量与目标函数

对于二维塑性成形问题，假设 G_0 和 G 分别表示最终成形件的理想形状和对应于任意一个预成形模具形状实际取得的最终成形件形状。优化设计的目标是通过设计预成形模具形状使实际工件形状接近或等于理想工件形状。因此，G_0 与 G 之间的差别是预成形模具形状的函数，其大小反映了预成形模具形状设计的准确性。目标函数定义为两个工件形状不重合区域的面积，如图 9.7-20 所示。因此，优化问题陈述为通过设计预成形模具形状，使形状 G 接近于 G_0。

对于一个经有限元离散化后的工件边界，假设所取得的实际工件 G 有 N 个边界结点，其坐标分别为（x_i，y_i），$i = 1, 2, 3, \cdots, N$，通过这些边界节点 i 并沿其法向向理想工件边界引直线，其交点构成了另一组在理想工件上的边界节点（x_{0i}，y_{0i}）$i = 1, 2, 3\cdots, N$，连接这两组边界节点，在两个工件形状 G_0 与 G 不重合区域内构成了一组四边形单元，这些单元的节点按逆时针方向编号，如图 9.7-21a 示，单元面积为

$$A_j = \frac{1}{2}(x_{32} y_{12} - x_{12} y_{32}) + \frac{1}{2}(x_{14} y_{34} - x_{34} y_{14}) \tag{9.7-73}$$

其中 $x_{ij} = x_i - x_j$，$y_{ij} = y_i - y_j$，i，$j = 1, 2, 3, 4$。

在特殊情况下，实际工件形状与理想工件形状相交，在边界上形成相交单元，如图 9.7-21b 所示。这种特殊单元的面积为

$$A_j = \frac{1}{2}(x_{35} y_{25} - x_{25} y_{35}) + \frac{1}{2}(x_{14} y_{54} - x_{54} y_{14})$$

其中（x_5，y_5）为交点坐标。

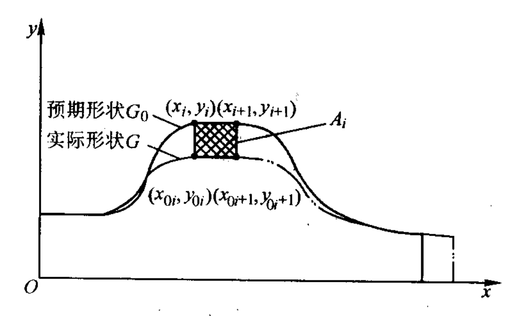


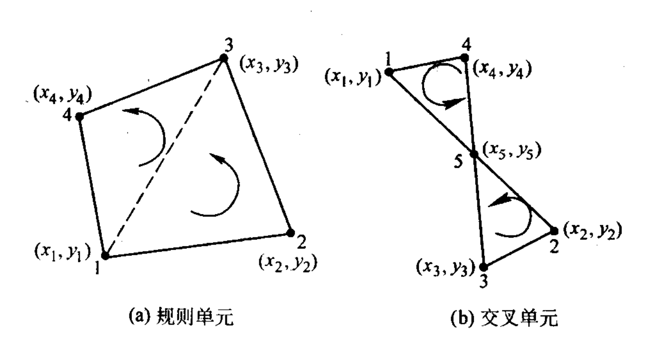
图 9.7-20　实际取得的终成形件与理想终成形件形状

应用各单元的面积 A_j 的平方和作为目标函数 ψ，即

$$\psi = \sum_{j=1}^{N} A_j^2 \tag{9.7-74}$$

当 ψ 接近零时，实际获得的最终成形件形状 G 将与理想终成形件形状 G_0 趋于一致。优化问题定义为通过使目标函数 ψ 取最小值的 B 样条曲线控制点的坐标定义最佳预成形模具形状。

采用三次 B 样条函数表示二维成形问题的预成形模具形状，变化 B 样条曲线的控制点坐标，可得到不同的 B 样条曲线形状。对于每个控制点，有两个自由度（p_{xi}，p_{yi}），$i=1$，2，⋯，K，K 为定义预成形模具形状的 B 样条曲线的控制点总数。因此，共有 $2K$ 个设计变量，对这种无约束的优化设计问题，可采用拟牛顿方法 BFGS 优化算法进行优化。



(a) 规则单元　　(b) 交叉单元

图 9.7-21　计算目标函数的单元

6.3　灵敏度分析

所谓灵敏度，指的是函数对变量的变化率。根据式 (9.7-74) 给出的目标函数表达式，推导目标函数 ψ 对优化设计变量 p_l 灵敏度如下：

$$\frac{\partial \psi}{\partial p_l} = \sum_{i=1}^{N} \frac{\partial \psi}{\partial x_i}\frac{\partial x_i}{\partial p_l} + \sum_{i=1}^{N} \frac{\partial \psi}{\partial y_i}\frac{\partial y_i}{\partial p_l} \quad l = 1,2,\cdots,2k \tag{9.7-75}$$

其中，$\frac{\partial \psi}{\partial x_i} = 2\sum_{j=1}^{N} A_j \frac{\partial A_j}{\partial x_i}$，$\frac{\partial \psi}{\partial y_i} = 2\sum_{j=1}^{N} A_j \frac{\partial A_j}{\partial y_i}$。

对于两个最终成形件不重合区域内的一般性单元 j 有

$$\frac{\partial A_j}{\partial x_1} = \frac{1}{2}\,(y_{34} - y_{32})$$

$$\frac{\partial A_j}{\partial x_2} = \frac{1}{2}\,(y_{32} - y_{12})$$

$$\frac{\partial A_j}{\partial y_1} = \frac{1}{2}\,(x_{32} - x_{34})$$

$$\frac{\partial A_j}{\partial y_2} = \frac{1}{2}\,(x_{12} - x_{32})$$

对于特殊的交叉单元 j 有

$$\frac{\partial A_j}{\partial x_1} = \frac{1}{2} y_{54}, \quad \frac{\partial A_j}{\partial y_1} = -\frac{1}{2} x_{54}$$

$$\frac{\partial A_j}{\partial x_2} = \frac{1}{2} y_{35}, \quad \frac{\partial A_j}{\partial y_2} = \frac{1}{2} x_{35}$$

在有限元速度场迭代收敛后，应用收敛的速度场刷新该时间增量内的结点坐标，其刷新公式为

$$\boldsymbol{X}^{(t+\Delta t)} = \boldsymbol{X}^{(t)} + \boldsymbol{V}^{(t)}\Delta t \tag{9.7-76}$$

其中，$\boldsymbol{X}^{(t+\Delta t)}$ 是 $(t+\Delta t)$ 时刻结点的坐标向量，$\boldsymbol{X}^{(t)}$ 表示 t 时刻结点的坐标向量，$V^{(t)}$ 表示 t 时刻结点的速度向量，将式（9.7-76）对优化设计变量 p_1 求偏导，得

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}^{(t+\Delta t)}}{\partial p_1} = \frac{\partial \boldsymbol{X}^{(t)}}{\partial p_1} + \frac{\partial \boldsymbol{V}^{(t)}}{\partial p_1}\cdot \Delta t \tag{9.7-77}$$

上式即为有限元节点坐标对优化设计变量的灵敏度刷新公式，当 $t=0$ 时，有 $\partial \boldsymbol{X}^{(0)}/\partial p_1 = 0$。

可见，一旦确定节点速度对优化设计变量的灵敏度 $\partial \boldsymbol{V}^{(t)}/\partial p_1$，即可根据式（9.7-77）确定出节点坐标对优化设计变量的灵敏度，进而由式（9.7-75）计算出目标函数对优化设计变量的灵敏度。

对于任意一个单元，t 时刻的节点速度灵敏度向量 $\frac{\partial \boldsymbol{V}^{(t)}}{\partial p_1}$，简记为 $\boldsymbol{V}_{,p1}$，可通过将单元平衡方程式（9.7-69）对优化设计变量求偏导得：

$$\left(\frac{\partial \boldsymbol{K}}{\partial \boldsymbol{V}}\boldsymbol{V} + \boldsymbol{K} + \frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial \boldsymbol{V}}\right)\frac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial p_1} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{K}\partial \boldsymbol{X}}{\partial \boldsymbol{X}\partial p_1}\boldsymbol{V} + \frac{\partial \boldsymbol{F}\partial \boldsymbol{X}}{\partial \boldsymbol{X}\partial p_1}\right) \tag{9.7-78}$$

上式简写为

$$\boldsymbol{R}\boldsymbol{V}_{,p1} = \boldsymbol{F}_{,p1} \tag{9.7-79}$$

其中，$\boldsymbol{R}$ 为单元的刚度灵敏度矩阵，$\boldsymbol{F}_{,p1}$，即 $\partial \boldsymbol{F}/\partial p_1$，是单元的节点力灵敏度向量，根据式（9.7-78）、式（9.7-70）和式（9.7-71），经推导得出矩阵 $\boldsymbol{R}$ 与向量 $\boldsymbol{F}$，p_1 的计算公式如下：

$$R_{ij} = \sum_{n=1}^{8}\sum_{m=1}^{8}\int_V \left(\frac{1}{\dot{\varepsilon}}\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \dot{\varepsilon}} - \frac{\bar{\partial}}{\dot{\varepsilon}^2}\right)\frac{1}{\dot{\varepsilon}} P_{in} v_n v_m P_{mj}\,\mathrm{d}V + K_{ij} + \frac{\partial F_i}{\partial v_j}\quad (i,\ j=1,\ 2\cdots,\ 8) \tag{9.7-80}$$

$$F_{i,p_1} = -\left(\sum_{n=1}^{8}\frac{\partial F_i}{\partial x_n}\frac{\partial x_n}{\partial p_1} + \sum_{j=1}^{8}\sum_{n=1}^{8}\frac{\partial K_{ij}}{\partial x_n}\frac{\partial x_n}{\partial p_1} v_j\right)\quad (i=1,\ 2,\ \cdots 8) \tag{9.7-81}$$

当用式（9.7-80）和式（9.7-81）计算出所有单元的刚度灵敏度矩阵和结点力灵敏度向量后，在整个工件上，对所有单元进行组装，得到一组关于结点速度灵敏度的线性方程：

$$\overline{\boldsymbol{R}}\ \overline{\boldsymbol{V}}_{,p1} = \overline{\boldsymbol{F}}_{,p1} \tag{9.7-82}$$

式中，$\overline{\boldsymbol{R}}$ 为整体刚度灵敏度矩阵；$\overline{\boldsymbol{V}}_{,p1}$ 为整体结点速度灵敏度向量；$\overline{\boldsymbol{F}}_{,p1}$ 为整体结点力灵敏度向量。

对于给定的一个初始预成形模具形状，首先进行预成形工序的有限元模拟，在每一时间增量模拟步内，进行速度场迭代，当速度场收敛后，按照式（9.7-82）求解节点速度灵敏度，然后，利用式（9.7-77）刷新节点坐标灵敏度。当整个变形过程（包括预成形与终成形工步）结束时，根据求得的最终节点坐标灵敏度、实际求得的终成形件形状与理想终成形件形状，利用式（9.7-74）与式（9.7-75）分别求出目标函数值及其梯度值。最后，调用优化工具进行优化迭代，判断或检查优化迭代是否已达到所规定的优化条件，若未满足优化条件，则利用得到的新控制点坐标刷新预成形模具形状，进行下一次优化迭代，直至达到所要求的优化条件。

6.4　预成形模具的优化设计过程

这里，以两工序锻造过程为例，讨论模具形状优化设计的具体过程。

对于一个多工序锻造问题，模具优化设计的目的是通过优化各预锻工序的模具形状来获得无缺陷、少无飞边的净形状（Net-Shape）终锻件。这种基于有限元过程模拟的优化设计的计算机程序框图如图9.7-22。

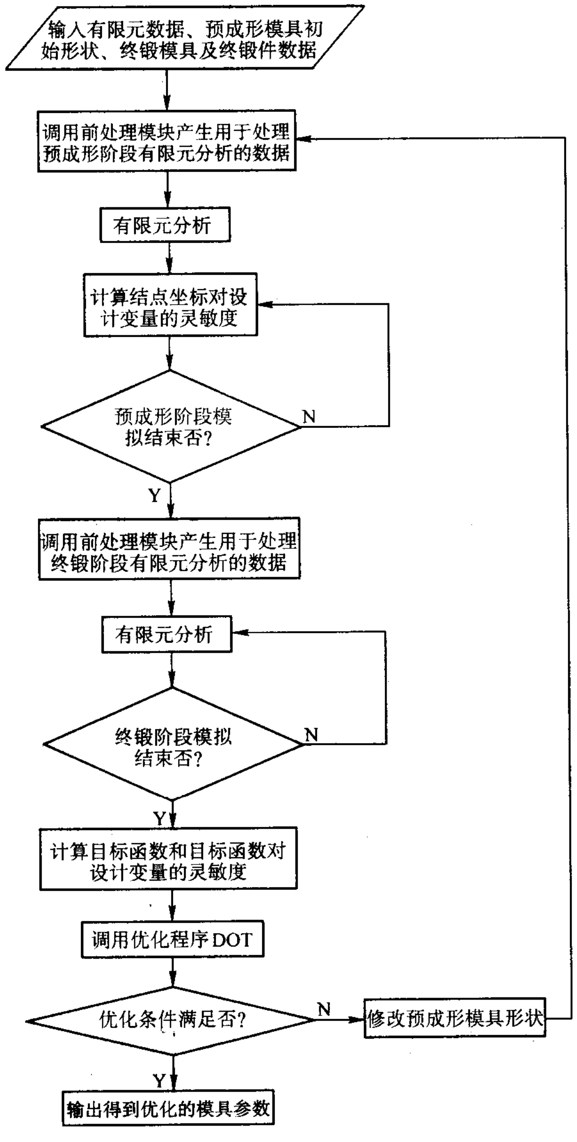


图9.7-22 模具优化设计程序框图

其详细的优化设计步骤为：

1）假定一个用于优化迭代的初始（猜测）预锻模具形状（即假设 B 样条函数控制点的初始坐标值）。

2）进行预锻工序的有限元正向模拟，对于每一个时间增量模拟步，首先进行有限元正向模拟的速度场迭代。当速度场收敛后，求解有限元结点速度灵敏度方程，利用求出的节点速度灵敏度刷新结点坐标灵敏度，直至预锻工序的变形过程模拟完毕。

3）在预锻工序模拟结束后，进行终锻工序的有限元正向模拟。由于终锻模具形状预先给定，且固定不变，故在终锻阶段，有限元结点速度灵敏度为零，不必进行终锻阶段的灵敏度分析，只进行有限元模拟。当终锻变形过程模拟结束后，应用所得到的实际终锻件形状、预先给定的理想终锻件形状及求得的累加结点坐标灵敏度，计算目标函数值及其对设计变量的梯度值。

4）调用优化工具进行优化，获得一组新的设计变量值，这组新的设计变量值定义了一个新的预锻模具形状。同时检查优化迭代的收敛性，如果连续两次迭代的目标函数值的绝对变化小于 max（$0.0001|F_0|$，10^{-20}），式中 F_0 为初次优化迭代的目标函数值，或者连续两次优化迭代的目标函数值的相对变化小于0.001，就认为优化迭代过程收敛。当前的设计变量值就定义了最佳预锻模具形状。若不满足优化迭代的收敛性条件，则用新得到的控制点坐标刷新预锻模具形状，重复步骤2）~4），进行下一次优化迭代，直至满足优化迭代的收敛性条件。

6.5 少无鼓形圆柱体镦粗过程优化实例

圆柱体镦粗过程是金属塑性成形中常用的制坯工序之一。当模具与工件接触面上存在摩擦时，在一个工序上，圆柱体自由镦粗变形过程不可能产生一个侧面无鼓形的终锻件，而且变形不均匀。应用基于灵敏度分析的模具优化设计方法对圆柱体镦粗过程进行优化设计，其目标是寻求最佳预锻模具形状，当用其锻造后的预锻件在一副平模之间进行终锻后能够获得侧面鼓形最小、满足高度尺寸要求的圆盘终锻件。

因圆柱体镦粗过程为轴对称问题，故只取1/4模型进行有限元分析和优化设计。此处介绍高度压下量50%的圆柱体镦粗变形过程的模具形状优化设计。假设初始圆柱体坯料尺寸为 $\phi100\times100$，变形材料为刚（黏）塑性体，变形为等温变形过程，材料的应力和应变率关系为 $\bar{\sigma}=Y_0\dot{\bar{\varepsilon}}^{0.145}$，其中 $Y_0=33.99$ MPa。假设坯料与模具接触面上的摩擦为常摩擦状态，其摩擦因子为0.3，下模静止不动，上模的运动速度为 -1.0 mm/s。一般来讲，表示预锻模具形状的 B 样条曲线控制点的数目大小取决于终锻（件）模具形状的复杂程度，如果终锻模具形状复杂，应取较多的控制点数目，但是较多的控制点数目会带来较多的运算时间。对于圆柱体镦粗过程，选取8个 B 样条控制点（p_{xi}，p_{yi}）（$p_{x1}>p_{x2}>\cdots>p_{xn}$）描述预锻模具形状，这样就有5条 B 样条曲线和16个优化设计变量 p_l（$l=1$，$2\cdots$，16）。为了保证预锻模具形状的起始点的横坐标为零，令 $p_{x1}=-p_{x3}=b$，$p_{x2}=0$，其中 b 为一正常数。因此在优化过程中，对 p_{x1}，p_{x2} 和 p_{x3} 施加上下限，p_{x1}，p_{x2} 和 p_{x3} 上下限分别为 $-b$、0和 b。其他设计变量无上、下限限制。

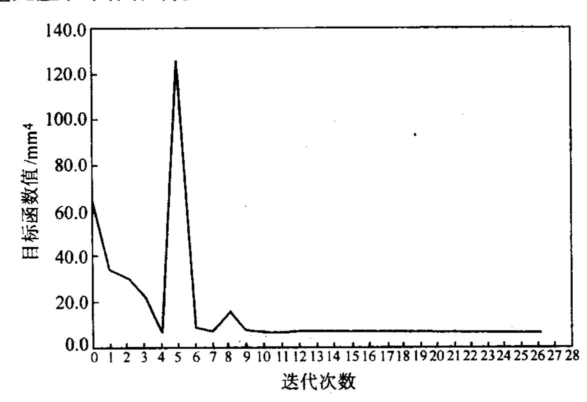


图9.7-23 目标函数值随优化迭代次数的变化曲线

假设镦粗压下量为50%。图9.7-23表示目标函数与优化迭代次数之间的关系曲线，当经过9次优化迭代后，目标函数值趋于稳定并几乎接近于零。每次迭代过程中的预锻件形状、预锻模形状及终锻后的终锻件形状如图9.7-24所示。经过9次优化迭代后所得到的预锻模具和预锻件，经终锻后可得到一个侧面几乎无鼓形的圆盘终锻件，其最小半径为69.52 mm，最大半径为70.44 mm，侧面鼓形的单边宽度仅为

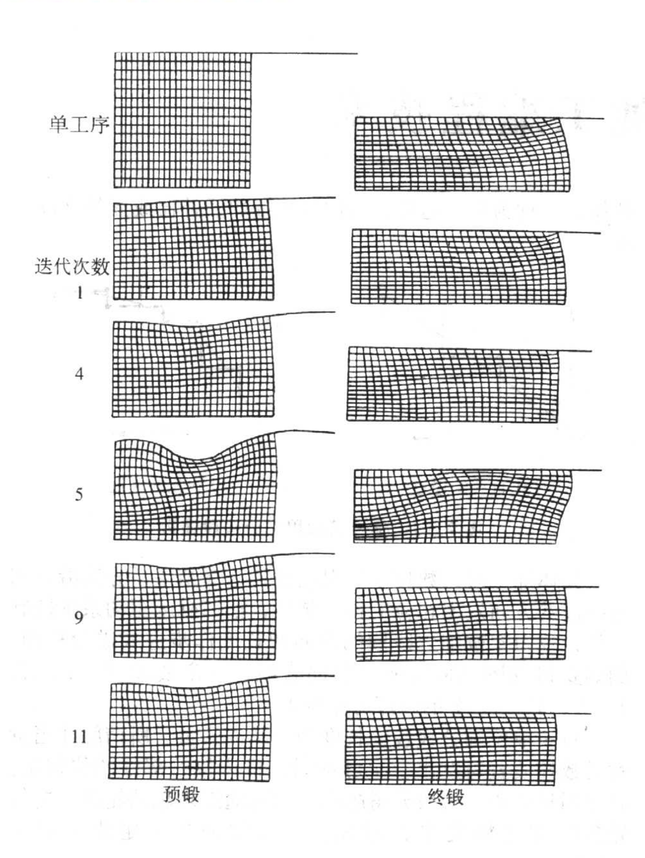


图 9.7-24　优化迭代过程中预锻件形状、预锻模具形状与终锻件形状变化

0.92 mm。理想终锻件半径为 70.71 mm，本例未考虑体积损失的调整，其有限元分析过程中的体积损失为 0.77%。因而使得优化得到的终锻件最大半径比理想终锻件半径小 0.27 mm。可见，采用优化方法所得到的最佳预锻模具形状，可大大降低终锻件鼓形现象，其材料利用率提高了 8.81%。图 9.7-25 为三种终锻件形状的比较，显然采用优化方法得出的预锻模具锻造出的终锻件形状几乎与理想终锻件形状相同。图 9.7-26 给出了预锻模具形状的优化迭代历史。经过 9 次优化迭代后，预锻模具形状几乎保持不变。

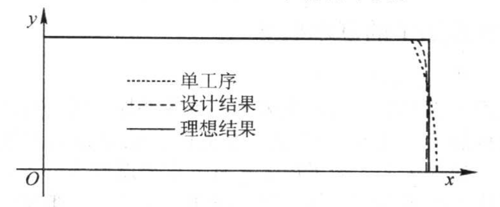


图 9.7-25　终锻件形状的比较

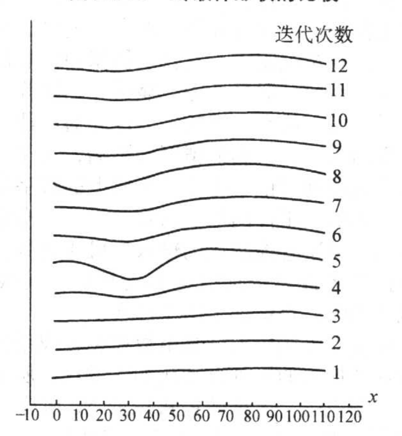


图 9.7-26　优化迭代过程中预锻模具形状的变化历史

编写：李志刚（华中科技大学）



第8章　数控加工编程技术

1　概述

1.1　数控加工的基本概念

(1) 什么是数控加工

数控加工是指在数控机床上进行零件加工的一种工艺方法。这种加工方法与一般加工方法仅在控制方式上有所不同。在普通机床上，为了加工出有一定精度要求的零件，需要对机床的各种动作，如开车、停车、进给、主轴变速等进行控制，既要控制机床各种动作的先后次序，又要控制机床各运动部件的位移量，而且开车、停车、进给、主轴变速等操作都是由人工直接控制的。在自动机床和仿形机床中，上述的操作和运动参数是通过凸轮、靠模、挡块等装置以模拟量的形式来设定的。虽有一定的灵活性和通用性，但是零件的加工精度受凸轮、靠模制造精度的影响，工序准备时间也长。数控机床则是利用记录在控制介质上的数字指令来操纵机床的各种动作的。工件的加工内容、尺寸和操作步骤等用数字代码表示，将这些控制代码输入到机床的数控装置或系统中，由数控装置或系统加以运算处理后，转换成各种信号，控制机床动作，自动加工出零件来。

因此，数控加工实质上就是由数控装置或系统代替人操纵机床进行零件加工的一种自动化加工方法。所用的机床设备称为数字控制机床，简称数控机床或 NC 机床。机床数控系统则是能自动阅读输入载体（记载零件加工程序的介质，如磁盘）上事先记录的数字代码，将其译码，并使机床动作和加工零件的一种控制系统。

数控机床具有广泛的适应性，加工对象改变时只需要改变输入的程序指令；加工性能比一般自动机床高，可以精确加工复杂型面，因而适合于加工中小批量、改型频繁、精度要求高、形状又较复杂的工件，并能获得良好的经济效益。

(2) 工件轮廓的生成方法

数控机床的执行部件，如工作台或刀架通常只能沿互相垂直的坐标方向作直线进给，因此当被加工工件上的轮廓为曲线轮廓或为与执行部件移动方向不一致的直线轮廓时，此工件轮廓就只能用沿工作台或刀架运动方向细分线段来逼近代替（图 9.8-1）。根据零件轮廓上已知的起点 *A*、终点 *B* 的坐标。求出各细分点坐标值，作为控制机床执行部件运动的依据，这称为插补运算，由数控系统的插补器或插补软件实现。

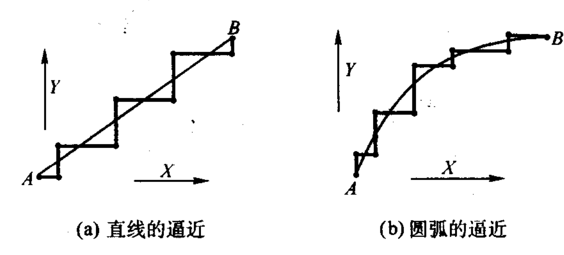


图 9.8-1　零件轮廓用细分线段逼近

具体加工时，数控系统根据插补运算结果，分别沿各细分线段的方向发出相应的指令脉冲，指挥机床驱动系统控制工作台或刀架按细分线段的方向和长度作步进式进给移动。例如要得到图 9.8-1a 所示斜向直线，一定要按 *X*、*Y*、*X*、*Y*、*X*、*Y*、*X*、*Y* 的顺序分配脉冲。

每一单位细分线段的长度为一脉冲当量。所谓脉冲当量就是数控装置每发出一个脉冲时，机床执行部件的位移量。脉冲当量越小，线段分得越细，就越逼近理想的轮廓，工件轮廓的加工精度也就越高。一般脉冲当量定为 0.01 ~ 0.005 mm。

具有沿直线分配脉冲功能的插补方式叫做直线插补。具有沿圆弧分配脉冲功能的插补方式叫做圆弧插补。目前生产中使用的数控机床，其数控系统都具有直线（图 9.8-1a）和圆弧（图 9.8-1b）两种插补功能，有些数控系统还具有抛物线和其他高次曲线的插补功能。

具有直线和圆弧插补功能的数控机床，在加工直线时，控制代码中只需给出直线的起点和终点的坐标信息；在加工圆弧时，控制代码只需给出圆弧起点和终点坐标以及圆心坐标或半径，机床数控系统就能自动进行插补运算，分配指令脉冲；控制机床按规定的直线或圆弧加工出所要求的工件轮廓表面。

(3) 数控加工作业过程

图 9.8-2 为用数控机床加工零件作业过程的示意图，通常由下述内容组成。

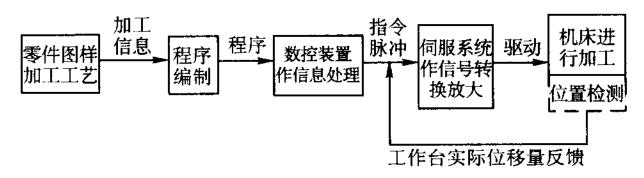


图 9.8-2　数控加工的作业过程

1）根据被加工零件的工序图样编写该零件的加工程序，包括根据加工要求把加工过程分成若干个程序段；确定各程序段的加工控制指令；计算刀具运动轨迹的坐标数据；按加工过程编排各指令以及按规定的自动控制语言和格式编写程序单；

2）将程序单中全部加工程序的信息记录在信息载体上；

3）通过输入装置将程序输入数控系统；

4）数控系统对输入的信息进行计算处理，根据处理结果向机床各坐标的驱动伺服系统分配进给脉冲，并发出必要的动作信号；

5）伺服系统将进给脉冲转换放大，驱动机床执行部件按要求的轨迹运动，并配以其他机床动作实现零件的加工。

(4) 数控加工中的几个重要术语

1）数控机床的坐标轴与运动方向。为了正确地控制数控机床的运动和进行程序编制，有关标准对机床坐标轴及运动方向做出了如下规定：

① 一个直线进给运动或一个圆周进给运动定义一个坐标轴。不论机床的具体结构是工件静止，刀具运动；还是工



件运动，刀具静止，一律假定工件不动，用刀具相对于工件作进给运动的方向确定坐标轴正向。

② 机床的直线进给运动的直角坐标系用 X、Y、Z 表示，称为基本坐标系。X、Y、Z 坐标轴的相互关系用右手定则决定（图 9.8-3a）。通常取 Z 轴平行于机床的主轴，Z 轴的正方向是使刀具远离工件的方向。X 轴取为水平且平行于工件的装夹面。在工件旋转的机床上，如车床、磨床等，X 轴的方向是在工件的径向并平行于横向拖板，刀具离开工件旋转中心的方向是 X 轴的正方向。在刀具旋转的机床上，如铣床、钻床等，若 Z 轴是水平的，则从刀具（主轴）向工件看时，X 轴的正向指向右边。如果 Z 轴是垂直的，对于单立柱机床，当从主轴向立柱看时，X 轴的正方向指向右边；对于双立柱机床，当从主轴向左侧立柱看时，X 轴的正方向指向右边（图 9.8-4）。

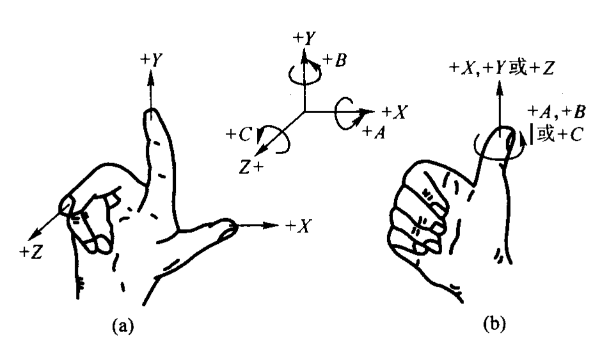
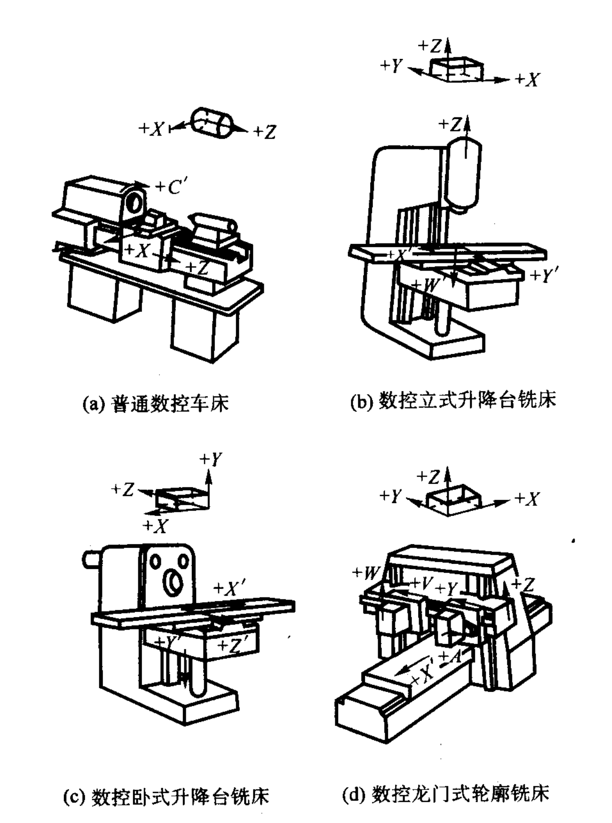


图 9.8-3　数控机床坐标和运动方向命名



(a) 普通数控车床　(b) 数控立式升降台铣床

(c) 数控卧式升降台铣床　(d) 数控龙门式轮廓铣床

图 9.8-4　几种数控机床的坐标系

③ 围绕 X、Y、Z 轴放置的圆周进给坐标轴分别用 A、B、C 表示，其正向按右手螺旋定则确定（图 9.8-3b）。

④ 如果在 X、Y、Z 主要直线运动之外，另有轴线平行于它们的坐标系，可命名为 U、V、W 轴，称为第二坐标系。再增加的第三坐标系用 P、Q、R 表示。同样，A、B、C 以外的转轴可命名 D 或 E 等。

2）数控机床的坐标数与联动轴数。对于一台数控机床来说，所谓坐标数是指有几个进给运动采用了数字控制。如果一台数控车床，其 X 和 Z 方向的进给运动采用了数字控制，则是一台两坐标数控车床；如果其 X、Y、Z 三个方向的进给运动都能进行数控，则是一台三坐标数控车床。有些数控机床的运动部件较多，在同一坐标轴方向上会有两个或更多的进给运动是数控的，所以还有四坐标、五坐标、甚至更多坐标的数控机床。

要注意的是，数控机床的坐标数不要与“两坐标加工”、“三坐标加工”相混淆。如果有一台三坐标数控铣床，若数控装置只能控制任意两坐标联动，则只能实现两坐标加工；若数控装置能控制三个坐标联动，则能实现三坐标加工。

3）机床坐标系与工件坐标系。机床坐标系是机床上固有的坐标系。其固定的坐标原点（也称机床原点），可用机床的坐标轴返回各自的原点（又称零点）以后，各坐标轴部件上的基准线和基准面之间的距离来确定。如立式数控铣床的机床原点为 X、Y 轴返回零点后主轴中心线与工作台面的交点，可由主轴中心线至工作台的两个侧面的给定距离来测定。

工件坐标系是编程人员在编程时使用的，由编程人员以工件图样上的某一固定点为原点（也称工件原点）所建立的坐标系。编程尺寸都按工件坐标系中的尺寸确定。在加工时，工件随夹具在机床上安装后，需测量工件原点与机床原点间的距离，这个距离称为工件原点偏置。

4）绝对坐标与相对坐标。数控编程时，工件上各加工点的坐标可用以下两种方式来描述：

① 相对方式（或增量方式）。其特点是处于坐标系中的各个点的位置，都是以该点的坐标与相邻点坐标之差表示。此方式表示工件上的尺寸或距离（如孔间坐标距离）比较直观，便于手工编程中的尺寸检查。但当改变工件上某一点的坐标值时，将影响相邻点的增量坐标值。

② 绝对方式。其特点是处于坐标中的每一个点的位置，都是以该点对坐标原点的坐标来表示。因此当改变工件上某一尺寸的坐标时，不会影响其他尺寸的坐标值。

例如在图 9.8-5 中的Ⅰ、Ⅱ两点，若以绝对坐标计，则 $X_{Ⅰ}=30$，$Y_{Ⅰ}=35$；$X_{Ⅱ}=12$，$Y_{Ⅱ}=15$。

若以相对坐标计，则Ⅱ点的坐标是在以Ⅰ点为原点建立起来的坐标系内计量的，所以Ⅱ点相对Ⅰ点的相对坐标为 $X_{Ⅱ}=-18$，$Y_{Ⅱ}=-20$。

目前的数控机床有的采用的是绝对坐标系统，有的采用的是相对坐标系统，也有的是两者兼有。编程时，应根据具体机床的坐标系类型，从编程方便（如根据图样尺寸的标注方式）及加工精度要求来考虑选用何种点坐标描述方式。

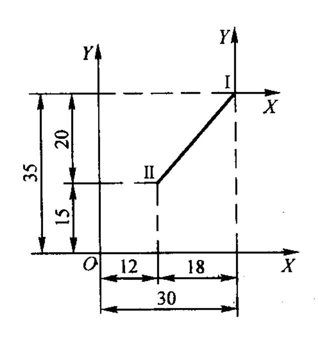


图 9.8-5　点的坐标的描述方式



1.2 数控机床的组成、分类及发展

(1) 数控机床的组成

如图 9.8-6 所示，数控机床由以下几个部分组成。

1) 输入介质　采用数控机床加工零件时，应首先将加工一个零件所必需的全部信息，如零件在机床上的装夹位置，零件加工的工艺路线或加工顺序，机床进给运动的方向、速度和位移大小，主运动的启、停、换向及变速，以及其他诸如刀具的选择、更换，工件的夹紧、松开，冷却和润滑的启停等，用标准的数控代码，按规定的方法和格式，编制成零件的数控程序并存放到一种便于输入给数控装置的信息载体上。这种信息载体称为输入介质，它可以是穿孔纸带、磁带或软磁盘等，其中以磁盘最为常用。输入介质是将人的操作意图传递给数控机床的中间媒介。

2) 输入装置　它的作用是将输入介质上的数控代码变成相应的电脉冲信号，传送并存入数控装置内。根据数控程序存储介质的不同，输入装置可以是光电读带机、磁带机或软盘驱动器。有些数控机床，不用任何程序存储载体，而是将数控程序单的内容通过数控装置上的键盘，用手工方式输入，或者通过计算机网络将数控程序由编程计算机传送到数控机床上。

3) 数控装置　数控装置是数控机床的中枢，它接受输入装置送来的脉冲信号，经过数控装置的系统软件或逻辑电路进行编译、运算及逻辑处理后，输出各种信号和指令，控制机床的各个部分进行规定的、有序的动作。

4) 伺服系统　伺服系统由伺服电路、伺服驱动装置、机械传动机构及执行部件组成。它的作用是接受数控系统发出的进给速度和位移指令信号，由伺服电路作一定的转换和放大后，经伺服驱动装置（交流或直流伺服电机、步进电机、电液脉冲马达等）和机械传动机构，驱动机床的工作台、主轴头架等执行部件实现工作进给和快速运动。数控机床的进给伺机服系统与常规机床的进给系统有本质上的差别，它能根据指令信号精确地控制执行部件的运动速度与位置，以及几个执行部件按一定规律运动所合成的运动轨迹。因此，伺服系统的性能在很大程度上决定了数控机床的加工精度、表面加工质量和生产效率。

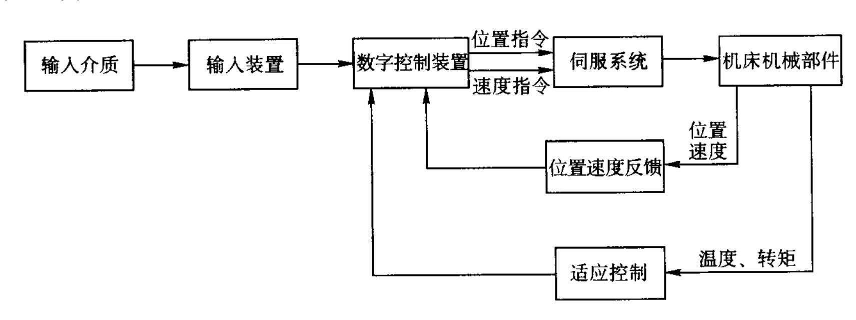


图 9.8-6　数控机床的组成

5) 反馈系统　反馈系统包括位置、速度反馈回路两个部分。位置、速度反馈回路的作用是将机床的实际位置、速度参数检测出来，转变成电信号，输送给数控装置，使数控装置能够校核机床的实际位置及实际速度是否与指令一致，如果不一致则由数控系统发出指令进行纠正。

如果数控机床配备了适应控制回路，则可在切削过程中随时检测某些状态参数（如切削力、转矩、功率、温度、振动、热变形等），并能根据预定的评价指标（如最大生产率、最低加工成本、最好加工质量等）或约束条件（如恒切削力、恒切削功率等），及时自动修正机床的输入参数（如切削速度、进给量、切削深度等），从而使切削过程达到最佳状态，以获得最优的切削效果。适应控制目前仅用于高效率和加工精度较高的数控机床，一般的数控机床还较少采用。

6) 机床的机械部件　数控机床的机械部件包括：主运动部件、进给运动执行部件（如工作台、拖板及其传动部件）和床身、立柱等部件；此外，还有转位、夹紧、冷却、润滑等辅助装置；对于加工中心类的数控机床，还有存放刀具的刀库，交换刀具的机械手等部件。数控机床机械部件的组成与普通机床相似，但传动部件之间的间隙较小，传动和变速系统便于实现自动化控制。

为了减少反向间隙，机床进给系统的机械传动链常采用滚珠丝杠或静压丝杠，以及无间隙齿轮副等；为了减小摩擦，提高运动的平衡性，机床多采用塑料减摩导轨或静压导轨；为了简化机床的传动机构，不用或少用齿轮传动和齿轮变速，而采用宽调速的进给伺服电动机和宽调速的主轴电动机；机床布局便于排屑和装卸工件，有些数控机床采用了自动排屑器和自动工件变换装置。

(2) 数控机床的分类

数控机床的种类很多，分类方法不一。根据数控机床的功能和组成，可以从如下几个不同的角度进行分类。

1) 按数控机床的加工功能分类

① 点位控制数控机床　点位控制机床只控制刀具或工作台从一点移至另一点的准确定位，然后进行定点加工，而点与点之间的路径不需控制。但是为了简化机床控制，一般使刀具或工件沿机床的坐标轴运动，而且在刀具或工件运动的过程中不进行切削。这类机床主要有数控钻床、数控冲床和数控镗床。机床有三个坐标轴，其中两个轴控制在加工平面内的坐标位置，另一个坐标轴控制钻镗切削或冲压运动，为了提高生产效率和保证定位精度，机床控制系统能实现快速定位以减少空行程时间，接近定位点时降低速度，以减少运动部件因惯性过大所引起的定位误差。

② 直线控制数控机床　直线控制数控机床除控制直线轨迹的起点和终点的准确定位外，还要保证被控制的两点间的位移轨迹是平行于某一坐标轴的直线，并且在直线位移过程中按需要的进给速度进行切削。直线控制的数控车床和数控磨床，只有两个坐标轴，可用于阶梯轴的车削和磨削加工。直线控制的数控铣床，有三个坐标轴，可用于平面铣削加工。

③ 轮廓控制数控机床　这类机床又称连续轨迹控制或多坐标联动数控机床。机床有几个坐标轴，数控装置能够同时连续控制两个或两个以上坐标方向的联合运动。为了使刀具按规定的轨迹加工工件的曲线轮廓，数控装置具有插补运算的功能，使刀具的运动轨迹以最小的误差逼近规定的轮廓曲线，并协调各坐标轴间的运动速度，以便在切削过程中始终保持规定的进给速度。这类机床的数控装置的功能是最齐全的。能够进行多坐标联动控制的数控机床，一般也能够进行点位和直线控制。除了少数专用的数控机床，如数控钻床、冲床以外，一般的数控机床，如能加工曲面的数控铣



床、数控车床、数控磨床、加工中心和数控电火花线切割机床等，都具有轮廓控制功能。

2）按所用进给伺服系统的不同分类

① 开环数控机床。开环数控机床采用开环进给伺服系统。通常开环进给伺服系统由步进电动机和步进电动机驱动线路组成（见图9.8-7）。机床数控装置发出的每一脉冲信号使步进电机转动一定的角度，通过滚珠丝杠推动工作台移动一定的距离。它没有位置检测器和反馈线路等环节。这种伺服系统比较简单，工作稳定，容易掌握使用，但精度和速度的提高受到限制。为提高定位精度，常设置有工作台反向间隙补偿和丝杠螺距补偿功能，能补偿机械传动链的误差。

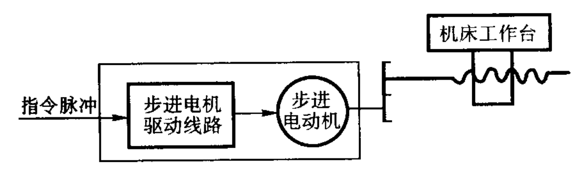


图9.8-7　开环进给伺服系统

② 半闭环数控机床。这种机床的进给伺服系统由比较线路、伺服放大线路、伺服电动机、速度检测器和位置检测器组成（图9.8-8）。速度检测器和伺服电动机同轴刚性连接，随时实测伺服电动机的转速；位置检测器装在丝杠或伺服电动机的端部，通过测量丝杠的回转角度间接测出工作台的实际位置。机床数控装置是根据来自位置检测器的位置反馈信息和来自速度检测器的速度反馈信息与指令信息相比较的结果来控制位置和速度的。常用的伺服电动机有宽调速直流电动机、宽调速交流电动机和电液伺服电动机。位置检测器有旋转变压器、光电式脉冲发生器和圆光栅等。位置检测反馈不包括由伺服电动机到工作台之间的机械传动链，所以也要用反向间隙补偿和丝杠螺距误差补偿。因此这种伺服系统称为半闭环进给伺服系统。其所能达到的精度、速度和动态特性优于开环伺服系统，为大多数中小型数控机床所采用。

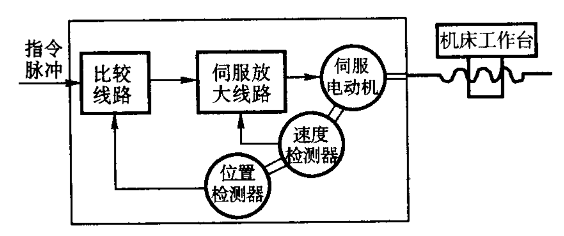


图9.8-8　半闭环进给伺服系统

③ 闭环数控机床。闭环数控机床进给伺服系统的工作原理和组成与半闭环伺服进给系统相同，只是位置检测器安装在工作台上（见图9.8-9），可直接测出工作台的实际位置，故反馈精度高于半闭环控制。缺点是系统复杂；机床本身被包含在位置环内，机床固有频率、阻尼和间隙等都可能影响系统的稳定性；调试维修较困难；成本也高。常用于高精度和大型数控机床。闭环伺服系统所用伺服电动机与半闭环相同，位置检测器则用长光栅、长感应同步器或长磁栅。

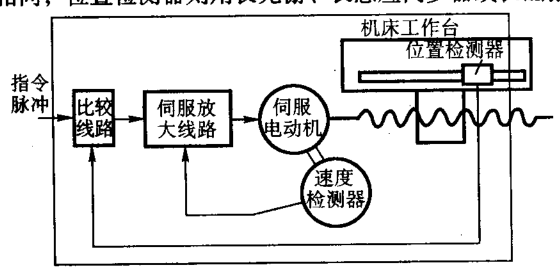


图9.8-9　闭环进给伺服系统

(3) 数控机床的发展

随着微电子、计算机、自动控制、伺服系统与自动检测等技术的迅速发展，表征数控机床水平和决定数控机床功能与特性的数控装置近几十年来也发展异常迅速。20世纪50年代初，美国帕森斯公司接受美国空军的委托，在美国麻省理工学院伺服机构研究室的协助下，于1952年试制成功世界上第一台数控铣床。当时的数控装置采用电子管元件，体积庞大，价格昂贵。1959年，采用晶体管元件和印制电路板，使数控装置进入第二代。1965年出现了第三代采用集成电路的数控装置，促进了数控机床品种和产量的发展。20世纪60年代末，先后出现了由一台计算机直接控制多台机床的直接数控系统（direct numerical control，简称DNC），又称群控系统，以及采用计算机控制的数控系统（computer numerical control，计算机数控，简称CNC），使数控制装置进入了以计算机化为特征的第四代。1974年研制成功使用微处理器和半导体存储器的微型计算机数控装置（micro computer numerical control，简称MNC），这是第五代。第五代与第三代相比，数控装置的功能增加了1倍，而体积则缩小为1/20左右，价格降低了3/4，可靠性也有了极大提高。

将计算机作为控制单元的数控系统称为计算机数控系统。计算机数控系统的硬件电路是由小型或微型计算机再加上通用或专用的大规模集成电路组成。数控机床的主要功能几乎全部由系统软件来实现，不同功能的机床其系统软件也不同。修改或增减系统功能时，不需变动硬件，只需改变系统软件，因此具有较高的灵活性。同时由于硬件基本上是通用的，这就有利于大量生产，提高质量和可靠性。所以，目前的数控机床几乎全都采用微型计算机数控系统。

用计算机对具有数控装置的机床群直接进行联机控制和管理的数控系统称为直接数字控制系统（群控），根据不同的机械加工要求，直接数控系统中所应用的计算机可以是不同档次的计算机，控制的机床由几台至几十台。各数控机床的CNC系统与DNC系统的中央计算机组成计算机网络，实现分级控制管理。直接数字控制技术的发展为柔性制造系统奠定了基础。

目前，数控机床的控制系统日益趋向于小型化和多功能化，并向着具有完善的自诊断功能发展。数控系统本身将普遍地实现自动编程。数控机床的类型将更加多样化，多工序集中加工的数控机床品种越来越多。激光加工等技术将应用在切削加工机床上，从而更加扩大多工序集中的工艺范围。数控机床的自动化程度更加提高，更多的数控机床将配备刀具和工件的自动交换装置和储存装置，并具有多种监控功能，从而形成一个柔性制造单元（flexible manufacturing cell，简称FMC），更加便于纳入高度自动化的柔性制造系统（flexible manufacturing system，简称FMS）中。

特别值得一提的是，近几年来高速机床发展极为迅速。转速为每分钟数万转的高速数控机床已进入实用化阶段。高速数控机床具有比普通数控机床高出10倍以上的生产效率。经高速加工后的模具型面，仅需稍加抛光即可达到使用要求，大大减少了机加工后的打磨、抛光工作量。高速数控机床已越来越多地在模具制造中应用。

2　数控加工程序的编制内容与过程

2.1　数控加工程序编制的内容

数控加工程序的编制是数控机床使用中最重要的一环。

数控机床之所以能加工出各种形状、尺寸和精度的零件，就是因为有编程人员为它编制不同的加工程序。

众所周知，在普通机床上加工零件时，应由工艺员制订零件的加工工艺规程。在工艺规程中规定了所使用的机床和刀具、工件的定位和夹紧方法、表面的加工顺序和加工尺寸、切削用量等内容。操作者按工艺规程所规定的“程序”加工。在数控机床上加工零件时，首先要进行程序编制。程编人员将在分析零件图样的基础上确定被加工零件的全部工艺过程、工艺参数以及工件与刀具相对运动轨迹的尺寸数据，用规定的文字、数字、符号组成代码，按一定的格式编写成加工程序，并将程序的信息通过控制介质输入到机床数控系统中，并由数控系统控制机床进行加工。这时机床操作者的工作只是装卸工件和刀具，载入加工程序，调整机床原点，按动开关及从旁监督机床加工。

我们把从分析零件图样和加工要求开始，到获得机床数字控制系统所需的程序指令或信息载体（如磁盘、磁带等）的整个工作过程，称为程序编制。

一般来说，用数控机床加工任何一种零件的程序编制，都要包含如下六个方面的工作（图 9.8-10）。

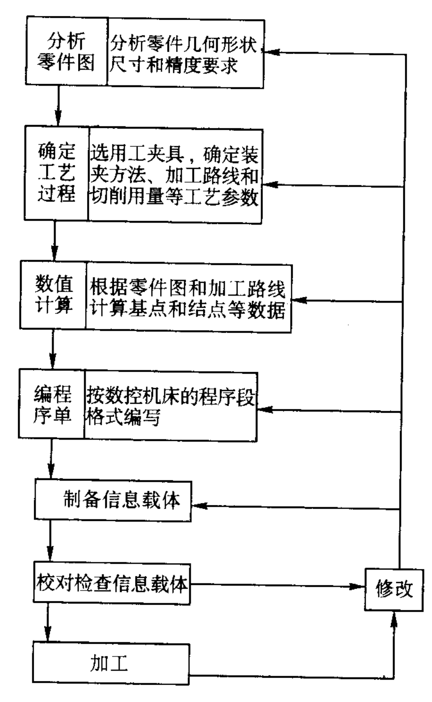


图 9.8-10 程序编制的内容与步骤

1）分析零件图样。首先分析零件的材料、形状、尺寸、精度以及毛坯热处理要求等。通过分析可以确定该零件是否适于在数控机床上加工，或者该零件的哪几个表面适于在数控机床上加工。

2）确定数控加工工艺过程。在分析零件图样的基础上，确定零件的加工方法（如机床、刀具与夹具的选定，工件的定位与夹紧方法的选择）和加工路线（如对刀点、进给路线），并确定切削用量等工艺参数（如进给速度、切削深度或宽度、主轴转速等）。

3）数值计算。根据零件图样和确定的加工路线，计算出数控机床所需的刀位点的坐标数据。

对于点位控制的数控机床，往往无需数值计算。如果零件图样的坐标数据与数控系统要求的输入数据不同，只需进行简单的换算即可。

对于直线、圆弧轮廓零件，若数控系统具有直线及圆弧插补功能和刀具半径补偿功能，数值计算也比较简单，仅需算出零件轮廓上相邻几何元素的交点或切点（如直线的起点及终点，圆弧的起点、终点和圆心）的坐标值，就能满足要求。

当零件形状比较复杂，并与数控系统的插补功能不一致时，需进行较复杂的数值计算。比如，由非圆曲线组成的平面零件，用直线插补功能的数控机床加工时，除了计算组成该零件轮廓相邻几何元素的交点和切点（称为基点）外，还要用直线逼近组成零件轮廓的所有几何元素，而且逼近误差要小于允许值。然后再求出相邻直线的交点（称为节点）。对于这种情况，需要借助于计算机完成数值计算工作。

4）编写零件加工程序。根据加工路线计算出来的刀位点的坐标数据和已确定的切削用量，结合数控系统对输入信息的要求，编写零件加工程序。

编写加工程序时，要了解数控机床加工零件的过程，以便在程序中包括必要的工艺指令，如机床启停、切削液的开闭等。

5）制备信息载体。将程序内容记录在信息载体上，作为数控装置的输入信息。若程序简单，也可直接将其通过键盘输入。现在，已有越来越多的企业采用网络传递加工程序，在这种情况下就不必制备信息载体了。

6）校对检查信息载体。信息载体的检查方法很多，具体采用何种方法需视本单位的检测手段而定。最通常而又比较有效的方法是将信息载体上的内容输入到机床数控装置进行机床的空运转检查。对于平面轮廓工件，可在机床上用笔代替刀具，坐标纸代替工件进行空运转绘图；对于空间曲面零件，可用木料或塑料工件进行试切，以此检查刀具运动轨迹的正确性。在计算机的图形显示器上仿真加工过程，检验和纠正程序中的错误，现已成为一种普遍应用的检验加工程序的方法。

2.2 数控加工程序的编制过程

数控加工程序编制方法有手工编程和自动编程两种。

手工编程时，整个程序的编制工作是由人工完成的。这就要求编程人员不仅要熟悉数控代码及编程规则，而且还必须具备机械加工工艺知识和数值计算能力。手工编程需耗费大量的劳动，即繁琐、费时，又容易出错。

自动编程时，编程人员只要根据零件图样的要求，用专门的、人们容易理解的编程语言，编出零件数控加工的语言程序（此程序称为零件源程序），将其输入计算机后，通过计算机编程系统对零件源程序的处理，可直接输出零件的数控加工程序代码。这样，手工编程中大量繁琐的数值计算、编写程序单等工作完全由计算机自动完成，实现了编程自动化。因此自动编程也称作计算机辅助编程。

在计算机辅助编程中，工艺处理阶段的全部或部分工作，以及零件的源程序的编写仍然是由人工完成的。

应该注意的是，用专用语言编写的零件源程序和手工编程所得到的零件加工程序有本质的区别。手工编程的零件加工程序，可直接用于控制数控机床进行零件加工；而零件源程序只能作为编程计算机处理的依据，不能控制数控机床。自动编程计算机对源程序处理后，所输出的结果才是所要求的零件加工程序和数控机床可用的数控代码。

为了处理源程序必须为编程计算机配置一套编程系统，也就是通常所说的编译软件。这个编译软件是根据具体的编程语言的要求，并结合具体的计算机编制而成的。

编程系统对零件源程序的处理，分主信息处理和后置信息处理两个阶段进行（图 9.8-11）。

在主信息处理阶段，编译程序将零件源程序翻译成计算机能够识别的机器语言并对数控加工时的刀具运动轨迹进行计算，从而得到刀具中心位置数据，简称刀位数据或 CLDA-

TA (Cutter Location Data)。此阶段的处理并不涉及数控系统的具体指令形式和机床的辅助功能，只与计算机的指令系统有关。因此，主信息处理软件对各类数控机床或数控系统都是通用的。

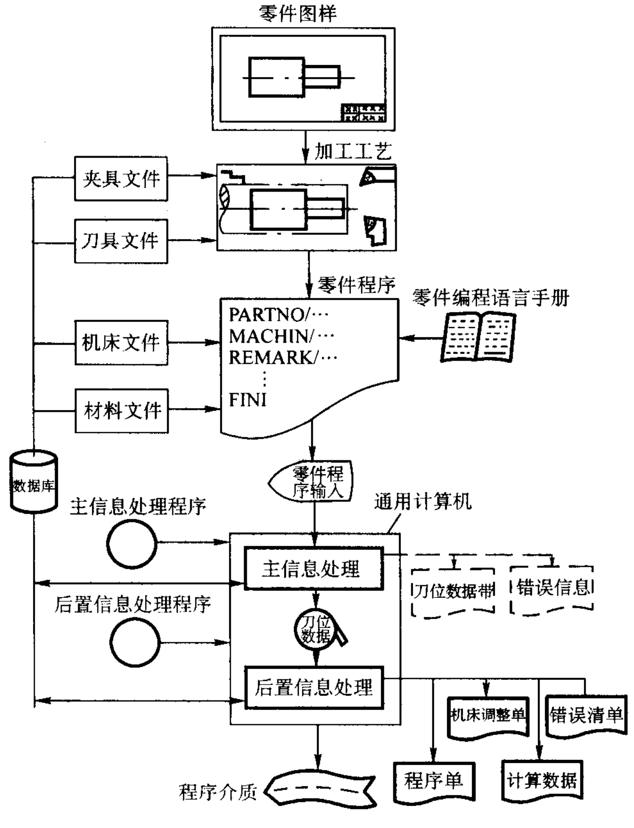


图 9.8-11 自动编程工作过程

主信息处理阶段输出的结果—— CLDATA 不能直接用在具体的数控机床上，必须通过专门的软件——后置信息处理程序，把 CLDATA 处理成适合于特定数控机床的指令，才能控制数控机床进行加工。因此，主信息处理程序的输出就是后置信息处理程序的输入。对于不同的数控机床来说，数控系统的指令形式不尽相同，机床的辅助功能也不一样，伺服系统的特性也有差别。因此，后置信息处理程序是不通用的，必须根据不同的机床和数控系统来编制。但手工编程中的大量数值计算是在主信息处理阶段，因而后置处理程序相对要简单得多。

计算机计算、处理的结果，通过外部设备可以直接输出数控加工程序单和载有数控代码的介质，也可以画出被加工零件的轮廓图形。

如果源程序有错，计算机能将错误的地址和错误的性质输出，以便进行修改。

显然，对于自动编程，程编人员应熟悉自动编程系统规定的“语言”、“语法”和源程序的编写方法，了解数控机床对程序编制的要求。当编制具体零件的加工程序时，要根据零件图样和要求，选用或设计工夹具，确定工件坐标系与机床坐标系的关系以及进给顺序，然后再编写零件源程序。

一般来说，加工形状简单的零件，例如点位加工或直线切削零件，用于手工编程所需的时间和费用与用计算机辅助编程所需用的时间和费用相差不大。当被加工零件形状比较复杂（如复杂凸轮轮廓、叶片曲面、螺旋桨桨叶曲面等），或几何元素虽不复杂，但程序量很大的零件（如一个零件上有数千个孔），或铣削轮廓时，数控装置不具备刀具半径自动偏移功能，而只能按刀具中心轨迹进行编程，这时若不采用计算机辅助编程，不仅在编程时间和费用上不合理，甚至用手工编程方法无法完成。

目前，绝大部分情况是采用人机交互式的编程方法。CAD/CAM 系统通常都提供了友好的用户界面，数控编程人员可以在图形显示器的屏幕上选择所需的功能。在屏幕上可以显示 CAD 产生的零件三维图形，并在其上规划走刀路径。CAM 软件可自动地计算出刀位轨迹，并产生刀位文件。用户只需点击后置处理功能菜单项目，系统便会自动将其转换为数控系统所要求的 NC 代码。在显示器上还可以显示走刀轨迹，仿真加工过程，检验是否存在干涉或过切等问题。

刀位轨迹显示验证的基本方法是：当零件的数控加工程序（或刀位数据）计算完成以后，将刀位轨迹在图形显示器上显示出来，从而判断刀位轨迹是否连续，检查刀位计算是否正确。

刀位轨迹显示验证的判断原则为：

1）刀位轨迹是否光滑连续。
2）刀位轨迹是否交叉。
3）刀轴矢量是否有突变现象。
4）凹凸点处的刀位轨迹连接是否合理。
5）组合曲面加工时刀位轨迹的拼接是否合理。
6）走刀方向是否符合曲面的造型原则（这主要是针对直纹面）。

加工过程的动态图形仿真验证已成为数控编程系统中刀位验证的重要手段，其基本思想是：采用实体造型技术建立加工零件毛坯、夹具的几何模型及刀具的几何模型，进行布尔运算（一般为减运算），采用真实感图形显示技术，把加工过程中的零件模型、夹具模型动态地显示出来，模拟零件的实际加工过程。其特点是仿真过程的真实感较强，基本上具有试切加工的验证效果。对于由于刀具受力变形、刀具强度及韧性不够等问题，目前还难以达到实际试切验证的效果。

加工过程的动态仿真验证，一般将加工过程中不同的显示对象采用不同的颜色来表示；已切削加工表面与待切削加工表面颜色不同；已加工表面上存在过切、干涉之处可采用另一种不同的颜色。对仿真过程的速度可进行控制，从而使编程员可以清楚地看到零件的整个加工过程，刀具是否啃切加工表面，刀具是否与约束面发生干涉与碰撞等。

3 数控自动编程技术的发展

随着数控技术的迅速发展和数控机床的广泛使用，对自动编程系统的研究近年来也取得了很大的进展，并有如下趋势和特点。

1）朝着小型语言系统发展。从自动编程发展的过程来看，自动编程系统基本上是朝着大而全和小而专方向发展的。目前主要是研制小型语言系统，以适应中小工厂使用微型计算机编程的需要。这种专用自动编程的着眼点不是放在功能齐全上，而是在如何简化程序和提高效率上。因此这类系统容易掌握，便于使用，且成本较低。

2）朝着加工技术处理语言系统发展。早期的自动编程系统（如 APT 系统）只能完成计算机辅助几何参数的计算，后来发展的自动编程系统则愈来愈多地考虑了工艺参数的自动确定问题。如前联邦德国的 4EXAPT（Extended APT）语言系统就是在 APT 的基础上扩充了工艺处理能力。只要给出零件的最终加工尺寸、精度及材料，该系统就能够自动确定加工顺序、刀具、进给速度和主轴转速等工艺参数，而且可以部分地解决工艺过程的优化问题。

3）朝着新的自动编程技术发展。如 20 世纪 70 年代后期发展起来的会话型自动编程、图形交互编程和数字化技术编程方法已在工业中应用，其后又发展了用语音实现人机联

系的语音编程方法。

随着自动编程技术的发展，对自动编程系统的功能和应用的方便性也提出了更高的要求。尤其是在处理零件的源程序的过程中，希望操作者能对计算机进行控制，就像与计算机进行对话一样。

会话型自动编程方法是在数控语言自动编程方法的基础上，增加“会话”功能而发展成的。程编人员通过键盘或其他输入装置，将用数控语言书写的零件源程序和会话型自动编程方法专用的会话命令送入计算机，计算机便在显示屏幕上显示出回答与提问。程编员进而用键盘输入回答提问所必要的数据和指令，并对零件源程序进行编辑修改后，就可以获得正确的数控加工程序。会话型自动编程系统的特点是：操作者可随时修改零件源程序；随时停止或开始处理过程；随时打印零件加工程序单或某一中间结果；随意给出数控机床的脉冲当量等后置处理参数。例如日本的 FAPT、荷兰的 MITURN 就都是这种会话型自动编程系统。

图形交互编程方法是计算机配备了图形终端和必要的软件后进行编程的一种方法。图形终端由鼠标器、显示屏幕和键盘组成，它既是输入设备，又是输出设备。利用它能实现人与计算机的“实时对话”，发现错误能及时修改。编程时，可在终端屏幕上显示出所要加工的零件图形，用户可利用键盘和鼠标器交互确定进给路径和切削用量，计算机便可按预先存贮的程序计算刀具轨迹，自动编制出零件的加工程序，并输出程序。这种方法现已得到广泛应用。

数字化技术编程方法适用于有模型或实物而无尺寸的零件加工的程序编制，因此也称为实物编程。这种编程方法应具有一台坐标测量机，用于模型的尺寸测量。测量机本身的控制计算机可以对测量数据进行处理，并能输出数控加工所需的程序。

语音编程法是利用人的声音作为输入信息，并与计算机和显示器直接对话，令计算机编出加工程序的一种方法。编程时，编程员只需对着话筒讲出所需的指令即可。编程前，应使系统“熟悉”编程员的声音，即首次使用该系统时，程编员需对着话筒讲该系统约定的各种词汇和数字，让系统记录下来并转换成计算机可以接受的数字指令。采用语音自动编程的主要优点是便于操作，可提高编程效率。

4）数控编程与 CAD 的集成　随着 CAD 技术的发展及工程数据库研究的日益深入，为 CAD 与 CAM 的集成奠定了基础。

集成化的 CAD/CAM 就是使设计和制造中的各项功能计算机化，并且通过一个公用的中心数据库把这些功能联结在一起。其结果是，CAD 系统能让设计人员以图形终端和计算机对话的方式来定义设计轮廓，进行运动分析、结构分析、力学性能分析和模型试验，并自动绘制工程图。然后，生产人员可以用 CAD 提供的零件描述作为 CAM 的起点，来为零件的生产编制工艺规程（computer aided process planning，简称 CAPP)，产生 NC 机床的程序，指挥机器人运送工件和刀具，以及用工厂管理系统指挥工厂的生产进度。

集成化的 CAD/CAM 的一个重要优点是，由于所有的信息都存储在计算机内，而不是纸上，数据从一个部门传送到另一个部门变得更迅速、更可靠，这样就能大大提高生产效率，减少差错。

数控编程与 CAD 的连接是 CAD/CAM 集成中的重要内容之一。对于集成的 CAD 和数控编程系统，NC 模块成为系统中的一个组成部分。当零件的几何图形利用 CAD 系统以交互的方式设计出来以后，NC 模块即可根据存贮的几何数据、标示的加工轮廓及给定的工艺数据自动生成数控编程语言（如 APT 语言）程序，并通过相应的后置处理程序转换成特定机床数控系统所要求格式的数控程序。

由于被加工的零件图形在屏幕上可任意旋转、放大、缩小，所以这些操作可以帮助程序员全面考虑加工轮廓，正确选择刀具并自动生成刀具轨迹。

由于数控程序的执行过程可以在屏幕上显示出来，因此还可以采用动态模拟的方法对数控程序进行可靠性检验。在动态模拟时，刀具可以实时地在屏幕上移动，刀具与工件接触之处，工件的形状就会按刀具移动的轨迹发生相应变化。由于加工过程中刀具的移动及工件形状的变化采用位移增量法，例如每隔 30 ms 左右就显示一次。因此对观察者来说，在屏幕上看到的是连续的、逼真的加工过程，因而很容易发现刀具与工件之间的干涉，刀具与机床的碰撞，以及其他错误的程序指令。为了便于观察和了解实际的加工过程，国外有些机床将屏幕显示和加工过程同步进行。这样，动态模拟不仅起着监控、检测作用，也使工作条件大为改善。

4　数控编程中的工艺处理

数控加工工艺问题与普通加工工艺的处理基本相同，但又有其特点。因此，在设计零件的数控加工工艺时，既要遵循普通加工工艺的基本原则和方法，又要考虑数控加工本身的特点和零件编程要求。

4.1　工序、工步的划分和顺序安排

在划分零件的数控加工工序、工步和安排工序、工步顺序时，除了应遵循先粗后精、先面后孔等基本工艺原则外，还应注意遵循以下各点：

1）为了减少换刀次数，减少空程时间，应按所用刀具来划分工序和工步，即在一次装夹中，用一把刀具加工完工件上所有需要用该刀具加工的各个部位后，再换第二把刀具加工。在自动换刀数控机床中大多采用这种方法来划分工序、工步，对于手动换刀的数控机床则更应注意这个问题。

2）对于同轴度要求很高的孔系，应在一次定位后，通过顺序连续换刀来完成该同轴孔系孔的全部加工，然后再加工其他坐标位置的孔，以消除重复定位误差的影响，提高孔系的同轴度，此时不可按所用刀具来划分工序、工步。

4.2　零件装夹方法的确定与夹具选择

数控机床上被加工零件的装夹方法与一般机床上一样，也要合理地选择定位基准和夹紧方案。为了充分发挥数控机床的效能，在确定零件装夹方法时，更应注意减少装夹次数，亦即要求在一次装夹中尽可能多地完成各个工序工步。为此，要尽量选用便于各个表面都被加工的定位方式。如对于箱体类零件，最好采用一面两销的定位方式，因为这种定位方式有利于刀具对箱体其他各个表面的加工。

数控加工中，为了尽量减少辅助时间，一般使用夹具来加快零件的定位和夹紧过程。数控加工对夹具主要有两方面的要求：一是要保证夹具本身在机床上安装准确；二是要便于协调零件和机床坐标系的尺寸关系，目的是为了保证工件能在正确的位置上按程序加工。夹具的结构大多比较简单，并应尽可能选用由通用元件拼装的组合可调夹具，以缩短生产准备周期，并获取较好的经济效果。

4.3　对刀点和换刀点的确定

对刀点就是数控加工时刀具相对于工件运动的起点。由



于程序也是从这一点开始执行，所以对刀点也称作程序起点或起刀点。编程时应首先考虑对刀点位置的选择。

对刀点可以设在工件上，也可以设在夹具上，但必须与工件的定位基准有一定的坐标关系（如图 9.8-12 中的 x_1 和 y_1），这样才能确定机床坐标系与工件坐标系之间的关系。

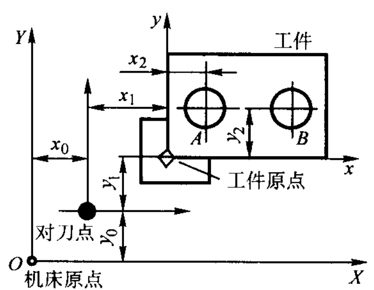


图 9.8-12　对刀点的设定

加工精度要求不高时，可直接用工件上或夹具上的某些表面作对刀面；加工精度要求较高时，对刀点应尽量选在零件的设计基准或工艺基准上。如以孔定位的零件，取孔的中心作为对刀点就比较合适。

对刀点的选择应便于坐标值的计算。对于建立了绝对坐标系统的数控机床，对刀点宜选在该坐标系的原点上，或选在距原点为确定值的点上。

对刀点应选择在对刀方便的地方。

对刀时应使对刀点与刀位点重合。所谓刀位点，对于平底立铣刀是指刀具轴线与刀具底面的交点；对于球头铣刀是指球头部分的球心；对于车刀是指刀尖；对于钻头是指钻尖；对于线电极切割机床，则是指线电极轴心与零件面的交点。对刀点找正的准确度直接影响加工精度，找正方法的选择应与零件加工精度要求相适应。目前工厂常用方法是将千分表装在机床主轴上然后转动主轴，以使刀位点与对刀点一致。

加工过程中需换刀时应规定换刀点。换刀点的位置应根据换刀时刀具不得碰伤工件、夹具以及机床的原则而设定。

4.4　进给路径的规划

进给路径是指数控加工过程中刀具（刀位点）相对于被加工零件的运动轨迹。规划进给路径时应遵循的原则是：

1）保证被加工零件获得良好的加工精度和表面质量。

2）使数值计算工作简单。

3）使进给路径最短。

对于点位控制的数控机床，一般要求定位精度较高，定位过程尽可能快，而刀具相对于零件的运动路线是无关紧要的。因此在规划进给路径时，对于点位控制的数控机床应使其空程最短。在点位加工中，除了考虑点位间的进给路径以外，还要确定刀具轴向的运动尺寸。其大小主要由被加工零件的孔深来决定的，但还应考虑一些辅助尺寸，如图 9.8-13 所示。图中 ΔZ 为刀具的轴向引入距离，ΔZ 的大小可按表 9.8-1 选取。

在数控车床上加工螺纹时，沿螺距方向的 Z 向进给和工件（即主轴）转动必须保持严格的相对运动关系。但考虑到沿 Z 向进给从停止状态达到指令的进给量，机床的进给系统总有一个过渡过程，因此安排 Z 向进给路径时，应使车刀刀位点离待加工螺纹有一定的引入距离 l_1（见图 9.8-14），以保证刀具起动后进给量达到稳定时才开始切削螺纹。通常取 $l_1=2\sim5$ mm，螺距大与精度要求高时 l_1 值取大些。

铣削平面零件时，一般采用立铣刀的侧刃切削。为了保证工件的外形光滑，铣刀的切入和切出点应沿零件周边外延（见图 9.8-15）。如果铣刀沿法向直接切入零件，将在零件外形上留下明显的的刀痕。

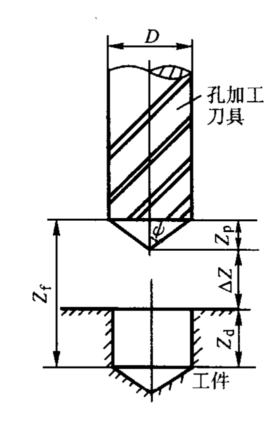


图 9.8-13　刀具的轴向行程

表 9.8-1　刀具引入点距离 ΔZ　　mm

工序 \ 零件表面状态	已加工表面	毛坯表面
钻　孔	2～3	5～8
镗　孔	3～5	5～8
铰　孔	3～5	5～8
攻螺纹	5～10	5～10

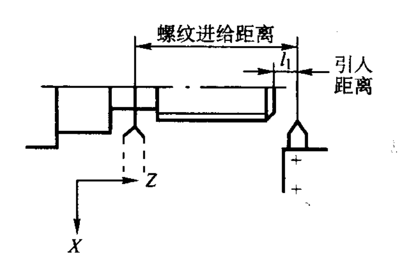


图 9.8-14　切削螺纹时的引入距离

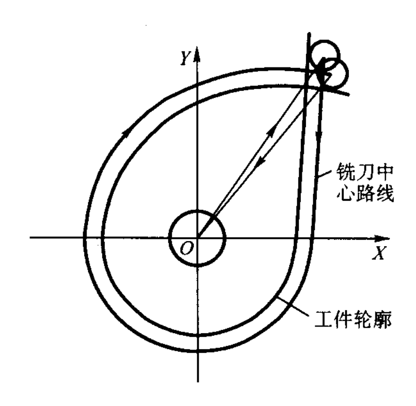


图 9.8-15　加工外轮廓的刀具路径

轮廓加工中应避免进给停顿。因为加工过程中工件、刀具、夹具以及机床等都有少量的弹性变形，进给停顿后切削力减小，刀具将在工件表面留下凹痕。

为了提高加工表面的精度，降低表面粗糙度值，可以采用多次进给的方法，使最后一次进给的加工余量较小（一般以 0.20～0.50 mm 为宜）。

对于孔的位置精度要求较高的零件，在精镗孔系时，安排镗孔的路线一定要注意做到各孔的定位方向一致，避免反向间隙的影响。例如图 9.8-16a 所示的进给路径，在加工孔Ⅳ时，X 的反向间隙将影响Ⅲ－Ⅳ孔的孔距精度；若按图 b 的



进给路径，可使各孔的定位方向一致，从而提高了孔距精度。

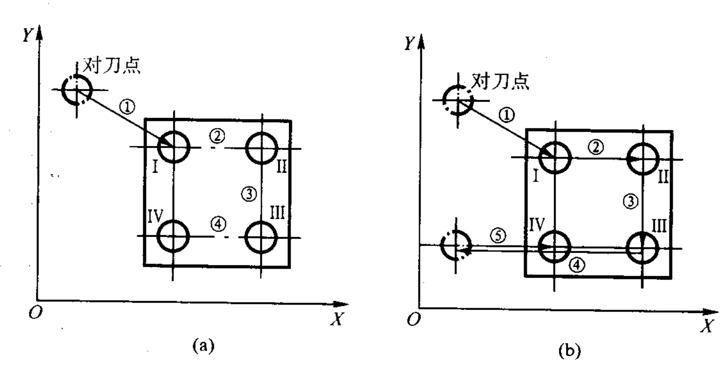


图 9.8-16　加工孔系的两种进给路径方案

图 9.8-17 所示为加工内槽的三种进给路径。所谓内槽是指以封闭曲线为边界的平底凹坑。加工内槽应使用平底铣刀，刀具边缘部分的圆角半径应符合内槽的图样要求。进给路径可以是行状的（如图 a 所示），也可以是环状的（如图 b 所示）。两种进给路径的共同点是都能切净内腔中的全部面积，不留死角，不伤轮廓。由于要尽量减少重复进给的搭接量，所以行切法将在每两次进给的起点与终点留下残留高度，即达不到所要求的表面粗糙度。如若按图 c 所示的方案，即先采用行切法，最后环切一刀，光整轮廓表面，就能获得较理想的效果。从数值计算的角度看，环切法的刀位点计算稍为复杂；从进给路径的长短比较，行切法也略优于环切法。

铣削平面零件内槽的封闭轮廓时，切入切出不能有外延部分。这时可沿零件轮廓的法线切入或切出，可能时其切入和切出点最好选在零件轮廓两几何元素的交点处。

图 9.8-18a 表示用球头刀加工直纹面时可能采取的两种进给路径，采用图 9.8-18a 的进给方案，每次沿直线进给，刀位点计算简单，程序段少，而且加工过程符合直纹面的形成，可以准确保证母线的直线度。采用图 9.8-18b 的进给方案，则符合这类曲面的数据给出情况，因此便于加工后检查型面的准确度，但程序段多。

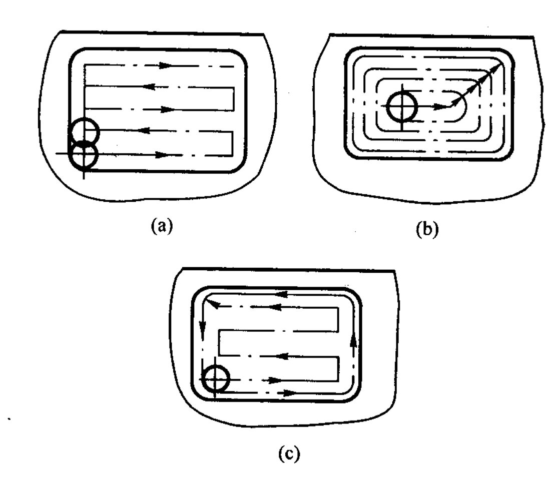


图 9.8-17　铣切内槽的三种进给路线

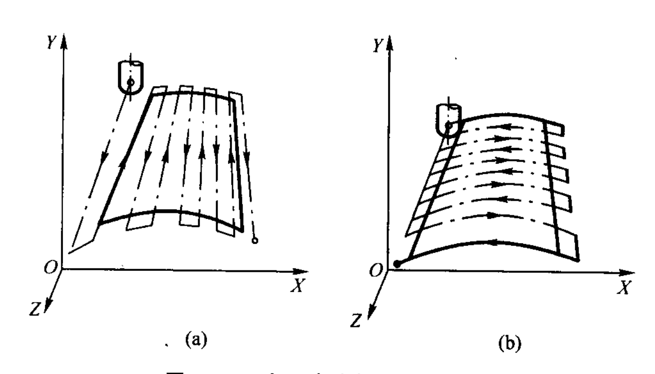


图 9.8-18　加工直纹曲面的进给路径

4.5　刀具选择

刀具选择是数控加工工艺中的一项重要内容，它不仅影响加工效率，而且直接影响加工质量。

数控加工台时费用高，为提高效益，数控加工对刀具提出了更高的要求，不仅要刚性好、精度高，而且要尺寸稳定、耐用度好、调整方便。

因此，凡加工情况容许选用硬质合金刀具时，就不应选用高速钢刀具。应尽量采用可转位刀片以减少刀具磨损后的更换和预调时间，选用涂层刀具以提高耐磨性。精密镗孔等应选用性能更好更耐磨的金刚石和立方氮化硼刀具。

由于数控机床所加工的零件品种有较大的范围，因而加工中所需刀具的种类、形状和尺寸的规格品种也较多，但应尽量选用标准刀具。

选择刀具时，要规定刀具的结构尺寸，并建立相应的刀具文件供刀具组装、预调及零件加工程序需要时调用和查询。

刀具文件是刀具各种信息记录的集合。完整的刀具信息应包括刀具的种类及其可能的加工范围，刀具的形状及主要尺寸，刀具对加工材料的切削用量，刀具与辅具的组合型式、预调尺寸，刀具的安装、夹紧方法和限制条件，以及刀具夹持部分（刀柄、刀杆等）的信息。刀具文件是编制零件加工程序的重要依据之一，也是刀具准备和管理的必要手段。刀具文件完善与否，直接影响刀具的合理使用、加工工



艺乃至加工系统的运行效率。

(1) 铣刀的选择

1) 粗铣平面时，切削力大，宜选较小直径的铣刀，以减少切削扭矩；精铣时，应选大直径铣刀，尽量能包容工件加工面的宽度，以提高切削效率。

2) 铣平面轮廓时，用平头立铣刀（图 9.8-19b），以立铣刀侧刃切削。若加工的是内凹轮廓，铣刀半径 $r_刀$ 应小于内凹轮廓面的最小曲率半径 ρ〔一般取 $r_刀=(0.8\sim0.9)\rho$〕，以避免干涉；若铣切的是外凸轮廓，铣刀半径应尽量选得大些，以提高刀具的刚度和耐用度。

用立铣刀侧刃铣轮廓时，铣刀螺旋角 ω 应尽可能使 $c=Bz\tan\omega/(\pi D)$（式中，B 为切削宽度或零件高度。z 为刀刃数，D 为铣刀直径）为整数。这样加工过程中切削面积就不会变化，切削就比较均衡。

3) 铣空间轮廓时，选球头立铣刀（图 9.8-19a），以立铣刀的球头和侧刃切削。对于像汽车覆盖件模具型面一类的曲面，若采用镶齿盘铣刀（图 9.8-19c），在五坐标联动的数控机床上加工，不仅效率可提高近 10 倍，而且能获得满意的加工精度。

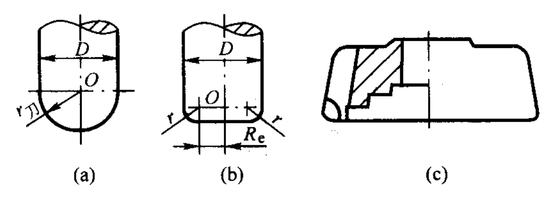


图 9.8-19 球头刀、平底立铣刀和盘铣刀

(2) 孔加工刀具的选择

数控加工一般不采用钻模、钻头刚度差，因此钻孔前应选用大直径钻头或中心钻先锪一个内锥坑或预钻，作为钻头切入时的定心锥面，然后再用钻头钻孔，而且要求孔深与孔径之比最好不要超过 5。钻大孔时应采用刚度较大的硬质合金扁钻。有硬皮时，应采用硬质合金立铣刀先铣去孔口表皮，然后锪锥孔和钻孔。

铰孔采用浮动铰刀，铰前孔口要倒角，铰刀两刀刃对称度要控制在 0.02~0.05 mm 之内。

由于镗孔是悬臂加工，为平衡径向力，减轻镗削振动，应采用对称的 2 刃或 2 刃以上的镗刀头进行切削。精镗应采用微调镗刀。

4.6 切削用量的确定

切削用量包括切削深度 a_p、进给量 f 和切削速度 v。对粗加工、精加工、钻孔、攻螺纹、尖角部位加工等，需要选用不同的切削用量，这些都应编写在程序单内。

确定具体切削工序的切削用量时，是以一定的刀具耐用度为前提的。由金属切削原理可知，对刀具耐用度影响最大的是切削速度 v，其次是进给量 f，影响最小的是切削深度 a_p。因此，从刀具耐用度出发，在选择切削用量时，应首先采用最大的切削深度，再选用大的进给量，然后根据确定的刀具耐用度选择切削速度。

对于数控加工，刀具耐用度至少应大于加工完一个零件，或最少不低于半个工作班。

(1) 切削深度 a_p

主要根据机床、夹具、刀具和工件的刚性决定。在允许的情况下，最好一次切净余量，提高加工效率。有时为了改善加工精度和表面粗糙度，也可以留少量余量（0.2~0.5 mm），最后光加工一次。数控机床的精加工余量可较普通机床的精加工余量小。

(2) 进给量（进给速度）f

应根据零件的加工精度和表面粗糙度要求，以及刀具和工件材料选取。当加工精度要求高时，进给量选小一些，如精铣时可取 20~50 mm/min，精车时可取 0.1~0.2 mm/r。最大进给量受机床拖动系统性能限制，并与脉冲当量有关。

进给量 f 在加工程序中用 F 指令（进给速度指令）给定。F 指令有两种表示方法。一种为代码法，即 F 后跟两位数字，这些数字不直接表示进给量的大小，而是机床进给速度数列中某种进给速度的编码号；另一种为直接给定法，即 F 后跟的数字也就是进给量的大小，例如 F100 表示走刀量 100 mm/min。这种指定方法较为直观，因此现在大多数数控机床均采用这种指定方法。

在轮廓加工中，选择进给量时应考虑轮廓拐角处的“超程”或“欠程”问题。例如，加工图 9.8-20 所示的零件时，铣刀将由 A 点运动到 B 点，再由 B 点运动到 C 点。如果进给速度较高，由于惯性作用，在 B 点可能出现超程现象，将拐角处的金属（图中的阴影部分）多切去一部分，而在加工外型面时，可能在 B 点处留有多余的金属未切去。为了克服这种现象，要选择变化的进给量，即在接近拐角处应适当降低进给量，过拐角后再逐渐升高。

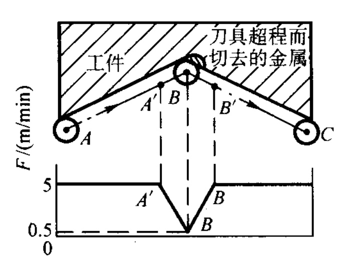


图 9.8-20 超程误差与控制

在加工过程中，由于切削力的作用，机床、刀具、工件系统产生变形，可能使刀具运动滞后，从而在拐角处产生“欠程”。欠程现象也可通过选择变化的进给量来克服。

(3) 切削速度 v

切削深度 a_p、进给量 f 确定以后，再按已经选定的刀具耐用度，通过计算或查切削用量手册即可决定切削速度 v (m/min)。进而可计算得到机床主轴转速 n (r/min)：

$$n=\frac{1\,000\,v}{\pi D}$$

式中，D 为工件（或刀具）直径，mm。

4.7 程编误差及其控制

程序编制中的误差主要由三部分组成。

1) 逼近误差。这是用近似计算方法逼近零件轮廓时所产生的误差。例如，当零件轮廓以列表点阵给出，列表点阵用样条曲线或参数曲面等近似方程去拟合时，近似方程所表示的形状与原始零件轮廓之间就有误差，这就是逼近误差。由于在多数情况下无法知道零件轮廓的准确数学表达式，所以通常很难确定逼近误差的大小。

2) 插补误差。这是用直线段或圆弧段逼近零件轮廓曲线所产生的误差。减小插补误差的最简单方法是密化插补点，但这会增加程序段数目，增加计算和编程工作量。

3) 尺寸圆整误差。这是将计算尺寸换算成机床脉冲当量时由于圆整数据所产生的误差。数控机床能反映的最小位移量是一个脉冲当量，小于一个脉冲当量的数据只能按四舍五入的办法处理，于是产生了误差。一般应控制尺寸圆整误差不超过脉冲当量的一半。

显然，在点位数控加工中，程编误差只包含一项圆整误差。在轮廓加工中，程编误差主要是插补误差，尺寸圆整误

差所占的比例较小。

插补误差相对于零件轮廓的分布形式有三种：即在零件轮廓的外侧，在零件轮廓的内侧，以及在零件轮廓的两侧，分别如图 9.8-21a、b、c 所示。选择哪种误差分布方式主要取决于零件图样的要求。从计算简单的角度考虑，可以采用图 9.8-22 所示的误差分布方式。这时节点全在零件的轮廓曲线上，误差分布在曲线的凹向。

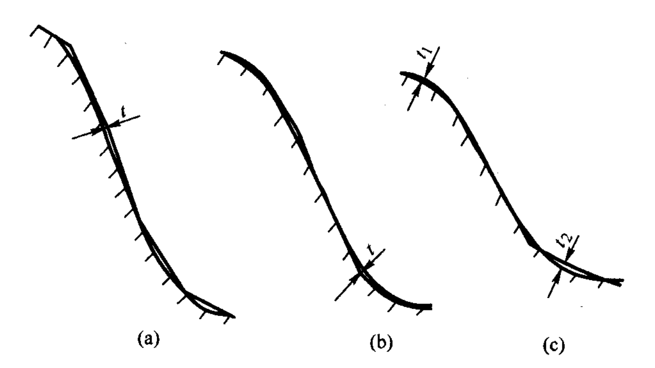


图 9.8-21 插补误差的三种分布形式

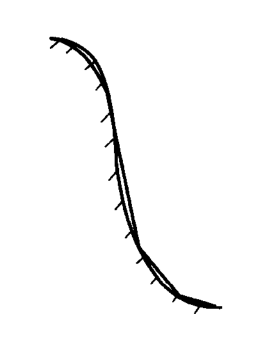


图 9.8-22 节点全在零件轮廓上的插补误差

数控加工误差中除了程序编制误差外，还有控制系统与拖动系统误差（它们由机床脉冲当量或分辨率的大小、脉冲从数控系统送出的不均匀性、控制系统的动态特性、插补器的形式与实现插补的算法等因素决定），零件定位误差、对刀误差、刀具磨损误差以及工艺系统的受力变形、热变形等等。所以，零件图样给出的公差，只允许一小部分分配给程编过程中所产生的误差。在生产中常取程编误差等于零件公差的 10% ~ 20%。

5 数控加工程序的编制方法

5.1 零件编程的通用标准

如前所述，用数控机床加工零件时，要编制零件加工程序。程序编制的方法有手工编程和计算机辅助编程。程序的编制可在生产准备部门进行，也可在加工现场或机床上进行。

为了统一和便于交流，不论采用哪种方法编程，都必须遵守一定的标准。下面介绍零件程编时必须遵守的一些通用标准。

5.1.1 程序代码

穿孔带也称控制带，或简称纸带。过去，它是数控加工中最常用的信息载体。在纸带上用穿孔形式记录了输入数控装置的信息指令。最常用的纸带是八孔穿孔带，如图 9.8-23 所示。其中有孔表示“1”，无孔表示“0”，第三列和第四列之间的连续小孔称为同步孔，作为每行信号孔的定位基准，并产生同步信号。

代码是数控系统传递信息的语言，一般用一个 8 位二进制数来表示，在穿孔带上则用一行孔表示。以不同孔位的排列表示各种数字、字母和符号。目前常用的代码有 ISO（International Standard Organization，国际标准化组织和 EIA（Electronic Industries Association）（美国电子工业协会）两种，见表 9.8-2。ISO 代码是补偶代码，第 8 列是补偶位；EIA 则是补奇代码，第 5 列是补奇位。所谓补偶（或补奇），即奇偶校验，是防止纸带穿错、破损或读带错误的措施，因为一只孔出错的概率最大。当每行孔数要求为偶数（或奇数）而错读一孔，即变为奇数（或偶数），可以通过奇偶校逻辑线路检查出来。由于通用计算机和电传打字机都采用补偶代码，因此，ISO 代码有较大的通用性。此外，ISO 代码较有规则，如凡数字在第 5 列和第 6 列都有孔，凡字母则在第 7 列都有孔等等。这给判别这些孔码的逻辑设计带来方便。

值得指出的是，现在穿孔纸带已经很少使用，但是关于二进制数控代码的规定仍是适用的。

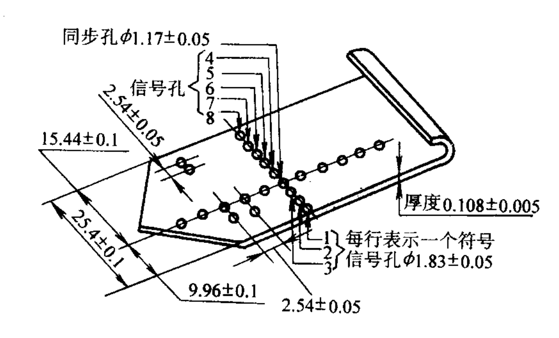


图 9.8-23 八通道标准穿孔纸带

5.1.2 程序格式

程序格式就是关于字符在穿孔带上排列的顺序和含义的规定。每种机床数控系统，都根据其功能要求和编程需要，规定有一定的程序格式。编程时，必须按规定的格式进行，否则，数控系统就无法按受，也无法执行。

（1）程序的组成

一个完整的零件加工程序由若干个程序段组成；一个程序段由若干个代码字组成；每个代码字则由文字（地址符）和数字（有些数字还带有符号）组成。字母、数字、符号统称字符。例如以下为一个完整的零件加工程序，它由 17 个程序段组成，每个程序段以顺序号字“N”开头，以符号 LF 结束。M02 作为整个程序结束的标志。每个程序段中有若干个代码字，如第 1 程序段就有 8 个代码字。

```
N001 G91 G00 X2700    Y3000    Z15000  M03  LF
N002                           Z-14800  LF
 ⋮                      ⋮
N017         X-5000 Y-4000   Z14800  M02  LF
```

（2）地址程序段格式的组成

数控系统是以执行指令的方式进行工作的。每条具体指令相当于程序中的一个字。数控机床为完成某一特定动作所需的全部指令，相当于由各相应的字组成的一个程序段。

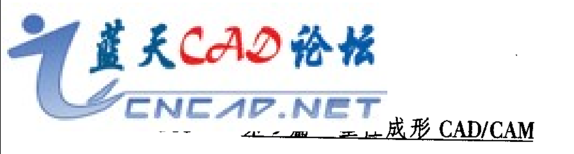
所谓程序段格式就是一个程序段中字的排列书写方式和顺序，以及每个字和整个程序段的长度限制和规定。常用的程序段格式有两种，即地址格式和分隔符顺序格式。现代数控机床广泛采用地址程序段格式，其程序段的长度可随字数和字长而变，故又称可变程序段地址程序格式。本节仅介绍地址程序段格式，关于分隔符顺序格将在以后说明。



表 9.8-2 数控机床用 EIA 和 ISO 代码表

EIA 标准代码

穿孔带代码									符 号	符号含义
8	7	6	5	4	0	3	2	1		
		●			·				0	数字 0
					·			●	1	数字 1
					·		●		2	数字 2
			●		·		●	●	3	数字 3
					·	●			4	数字 4
			●		·	●		●	5	数字 5
			●		·	●	●		6	数字 6
					·	●	●	●	7	数字 7
				●	·				8	数字 8
			●	●	·			●	9	数字 9
	●	●			·			●	A	绕着 *X* 轴的转角
	●	●			·		●		B	绕着 *Y* 轴的转角
	●	●	●		·		●	●	C	绕着 *Z* 轴的转角
	●	●			·	●			D	中间停留机能
	●	●	●		·	●		●	E	其他用
	●	●	●		·	●	●		F	进给速度
	●	●			·	●	●	●	G	准备功能
	●	●		●	·				H	输入（刀具补偿数）
	●	●	●	●	·			●	I	圆弧起点对圆心沿 *X* 轴坐标
	●		●		·			●	J	圆弧起点对圆心沿 *Y* 轴坐标
	●		●		·		●		K	圆弧起点对圆心沿 *Z* 轴坐标
	●				·		●	●	L	其他用
	●		●		·	●			M	辅助功能
	●				·	●		●	N	程序号
	●				·	●	●		O	不用
	●		●		·	●	●	●	P	其他用
	●		●	●	·				Q	其他用
	●			●	·			●	R	平行于 *Z* 轴的第三坐标
		●	●		·		●		S	主轴转速
		●			·		●	●	T	刀具功能
		●	●		·	●			U	平行于 *X* 轴的第二坐标
		●			·	●		●	V	平行于 *Y* 轴的第二坐标
		●			·	●	●		W	平行于 *Z* 轴的第二坐标
		●	●		·	●	●	●	X	*X* 轴方向的主运动
		●	●	●	·				Y	*Y* 轴方向的主运动
		●		●	·			●	Z	*Z* 轴方向的主运动
	●	●		●	·		●	●	:	冒号
	●	●	●		·				+	加
	●				·				-	减
	●			●	·	●			*	乘
		●	●		·			●	/	除（省略）（跳带）
		●	●	●	·		●	●	;	分号
		●		●	·	●			(	括号开
	●	●	●	●	·	●			)	括号闭
	●		●	●	·		●	●	%	百分比
				●	·		●	●	Stop（ER）	纸带倒带停止
		●	●	●	·	●	●		Tab	制表（或分隔符号）
●					·				CR（或 EOB）	程序段结束
	●	●	●	●	·	●	●	●	Delete	注销
			●		·				Space	空格



续表 9.8-2

ISO 标准代码										
穿孔带代码									符　号	符号含义
8	7	6	5	4	0	3	2	1		
		●	●		·				0	数字 0
●		●	●		·			●	1	数字 1
●		●	●		·		●		2	数字 2
		●	●		·		●	●	3	数字 3
●		●	●		·	●			4	数字 4
		●	●		·	●		●	5	数字 5
		●	●		·	●	●		6	数字 6
●		●	●		·	●	●	●	7	数字 7
●		●	●	●	·				8	数字 8
		●	●	●	·			●	9	数字 9
	●				·			●	A	绕着 X 轴的转角
	●				·		●		B	绕着 Y 轴的转角
●	●				·		●	●	C	绕着 Z 轴的转角
	●				·	●			D	中间停留机能
●	●				·	●		●	E	其他用
●	●				·	●	●		F	进给速度
	●				·	●	●	●	G	准备功能
	●			●	·				H	输入（刀具补偿数）
●	●			●	·			●	I	圆弧起点对圆心沿 X 轴坐标
●	●			●	·		●		J	圆弧起点对圆心沿 Y 轴坐标
	●			●	·		●	●	K	圆弧起点对圆心沿 Z 轴坐标
●	●			●	·	●			L	其他用
	●			●	·	●		●	M	辅助功能
	●			●	·	●	●		N	程序号
●	●			●	·	●	●	●	O	不用
	●		●		·				P	其他用
●	●		●		·			●	Q	其他用
●	●		●		·		●		R	平行于 Z 轴的第三坐标
	●		●		·		●	●	S	主轴转速
●	●		●		·	●			T	刀具功能
	●		●		·	●		●	U	平行于 X 轴的第二坐标
	●		●		·	●	●		V	平行于 Y 轴的第二坐标
●	●		●		·	●	●	●	W	平行于 Z 轴的第二坐标
●	●		●	●	·				X	X 轴方向的主运动
	●		●	●	·			●	Y	Y 轴方向的主运动
	●		●	●	·		●		Z	Z 轴方向的主运动
		●		●	·	●	●		:	冒号
		●		●	·		●	●	+	加
		●		●	·	●		●	−	减
●		●		●	·		●		*	乘
	●		●	●	·	●			/	除（省略）
●		●		●	·	●			;	分号
●		●	●	●	·	●		●	=	等号
		●		●	·				(	括号开
●		●		●	·			●	)	括号闭
		●			·	●			$	单元符号
●		●			·	●		●	%	百分比
				●	·			●	Tab	制表（或分隔符号）
				●	·		●		CR 或 LF	程序段结束
●	●	●	●	●	·	●	●	●	Delete	注销
●		●			·				Space	空格



1）程序段内字的顺序：各字的先后顺序并不严格，但为编程方便起见，一般习惯的排列顺序如下：

N-	G-	X-	Y-	…	F-	S-	T-	M-	LF-
顺序号字	准备功能字	尺寸字			进给功能字	主轴转速功能字	刀具功能字	辅助功能字	程序段结束

程序段

在同一程序段中，X、Y、F、S、T 等字不能重复，但不同组的 G 功能或 M 功能可以多于一个；不需要的字略去；与上一程序段相同的模态（续效）字可以省略。

2）程序段内各字的说明。

① 顺序号字。由地址码 N 和后面的若干位数字构成，用来识别程序段的编号。例如，N001、N010 分别表示是第一程序段和第 10 程序段。

②准备功能字（G 功能字）。由地址码 G 和两位数字构成，用来描述机床的动作类型，如 G01 表示直线插补功能，G02 表示顺时针圆弧插补功能。常用的 G 功能见表 9.8-3。

表 9.8-3　常用 G 功能代码

代　码	功　能	代　码	功　能
G00	点位控制	G35	螺纹切削，减螺距
G01	直线插补	G36 ~ G39	保留作控制用
G02	顺时针方向圆弧插补	G40	取消刀具偏移
G03	逆时针方向圆弧插补	G41	刀具左偏
G04	暂停（延迟）	G42	刀具右偏
G06	抛物线插补	G43	刀具偏置（+）
G08	加速	G44	刀具偏置（-）
G09	减速	G60	准确定位
G17	XY 平面选择	G65 ~ G79	保留用于点位系统
G18	ZX 平面选择	G80	取消固定循环
G19	YZ 平面选择	G81 ~ G89	固定循环 #1 ~ #9
G33	螺纹切削、等螺距	G90	绝对坐标编程
G34	螺纹切削，增螺距	G91	相对坐标编程

③ 尺寸字。尺寸字由地址码、+、- 符号和绝对值（或增量）的数字构成，用来表示各坐标的运动尺寸。尺寸字码有 X、Y、Z、U、V、W、P、Q、R、I、J、K、A、B、C 等。坐标尺寸字的正号“+”可省略。例如 X100、Y120、Z50 分别表示 X、Y、Z 坐标方向的移动量。

④ 进给速度功能字。由地址码 F 和其后面的若干位数字构成。这个数字的单位可以是 mm/r 或 mm/min，也有用进给率数 min^{-1}表示，取决于每个数控系统所采用的进给速度指定方法。

⑤ 主轴转速功能字。由地址码 S 和其后面的若干位数字构成，其单位可以是转速 r/min 或切削速度 m/min。

⑥ 刀具功能字。由地址码 T 和若干位数字构成。在自动换刀的数控机床中，该指令用以选择所需的刀具。刀具功能字中的数字代表刀具的编号。

⑦ 辅助功能字（M 功能字）。由地址码 M 和两位数字表示。常用的 M 指令见表 9.8-4。各种数控系统的 M 功能并不完全相同。因此，在编程时必须了解所使用的数控系统的 M 功能。

表 9.8-4　常用 M 功能代码

代　码	功　能	代　码	功　能
M00	程序停机	M14	主轴逆转并开切削液
M01	任选停机	M15	正向（+）运动
M02	程序结束	M16	负向（-）运动
M03	主轴顺时针方向旋转	M19	主轴定向停止
M04	主轴逆时针方向旋转	M30	纸带终了
M05	主轴停转	M31	旁路互锁
M06	换刀	M32 ~ M35	恒切削速度
M07	开 2 号切削液	M40 ~ M45	可用于变换齿轮，否则不用
M08	开 1 号切削液	M50	开 3 号切削液
M09	关闭切削液	M51	开 4 号切削液
M10	夹紧	M60	换工件
M11	松开	M68	工件夹紧
M13	主轴顺转并开切削液	M69	工件松开

程序段结束　在每一程序段结束之后，均应加上程序段结束码。在 ISO 代码中用 LF，在 EIA 代码中用 CR。

5.2　点位、直线控制系统的程序编制

如前所述，数控机床就其控制功能来说，可以分为点位、直线控制和轮廓控制，因此，数控加工程序的类型也就相应区分成点位、直线切削程序编制和连续轨迹程序编制两种。它们的主要不同点在于：点位程序只用于在一个点（孔）上定位，然后完成一种操作（例如钻孔），刀具在各点（孔）之间的移动轨迹无关紧要；而轮廓加工程序的刀具轨迹是由程编人员规定的，应用于连续切削加工。因此，在编制点位控制系统加工程序时，需注意下面几个方面的问题。

1）进给路线要短。虽然点位控制加工对刀具移动轨迹没有什么要求，但是在程序编制时必须保证刀具或工作台从一个位置移至下一个位置时，不致与工件、夹具和机床碰撞，而且进给路线要尽可能短。

2）定位要准确。为此必需提高对刀精度；零件装夹时，应尽量使定位基准与设计基准重合；编程选择坐标指令时，应尽量与图样的尺寸标注方法一致，避免尺寸换算。例如，若图样尺寸为链式标注，编程时宜用增量坐标指令；若图样尺寸为坐标式标注，编程时宜用绝对坐标指令。

3）刀具预调。在钻镗床、加工中心机床等机床上加工零件时，切削尺寸是由程序规定的。为了计算出刀具的行程长度（即程序指令值），编程时必须知道每把刀具的长度尺寸 Z_r、刀具顶端至工件表面的距离 Z_s、被加工零件钻削深度 Z_d 以及刀具引入量 ΔZ_a 和刀具超出量 ΔZ_b。刀具轴向各尺寸关系如图 9.8-24 所示。其中，Z_0 对于每一种机床是已知的一定值，刀具行程长度为（$\Delta Z_a + Z_d + \Delta Z_b$），而刀具长度尺寸 Z_r 需通过刀具预调确定。

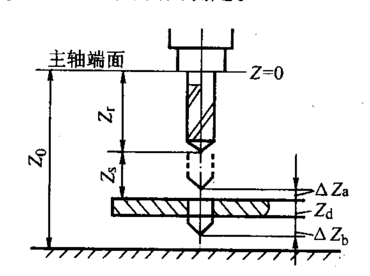


图 9.8-24　刀具轴向尺寸关系

图 9.8-25 为用机械式预调装置进行刀具预调方法的示例。钻头装在刀夹中，刀夹装在刀具预调装置的座孔中，座孔端面 *A* 相当于图 9.8-24 中的主轴端面。当精度要求不高时，可用游标高度尺测量出 Z_r 值；若精度要求高，则应使用千分表、块规等来测量。

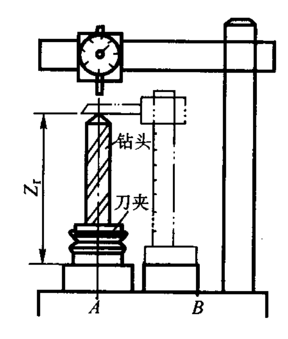


图 9.8-25　采用机械式预调装置预调刀具

需指出，对于点位加工，被加工的孔径尺寸是由刀具保证的，与控制系统无关，而孔距尺寸精度则取决于机床的控制系统与机械系统的精度以及与程编有关的误差。

图 9.8-26 是点位加工的程序编制实例。工件要求在 *a*、*b*、*c*、*d* 点处钻孔，NC 机床的脉冲当量为 0.01 mm，程序采用增量坐标指令。加工程序列于表 9.8-5 中。

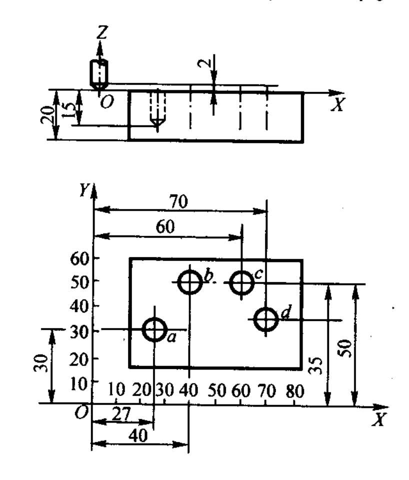


图 9.8-26　钻孔工件

N002 和 N005 中 G 功能栏未填，表示前一程序段 N001 和 N004 中所规定的 G 功能仍有效。N006 中没有指定进给速度，所以 N003 的 F200 仍保持有效。中间插入 G00，此程序段表示实现快速进给而无视 F200 的进给速度。但在 G00 执行完毕后，F200 的功能仍保持不变。

5.3　轮廓控制系统的程序编制

轮廓控制系统又称为连续控制系统。由于它能同时控制机床的几个坐标动作，并能使几个坐标方向的运动之间保持预先确定的关系（如直线、圆弧、平面或空间曲线），因而能把工件加工成某一形状的轮廓。

轮廓控制系统的加工程序编制工作最大的困难之处是数学处理比较复杂，而多坐标轮廓编程较之两坐标轮廓编程则更为不易。为简明扼要起见，下面将侧重于铣削平面轮廓零件编程时的数值计算及编程方法的讨论。

众所周知，零件加工程序是用刀位点的运动轨迹来描述的。对于圆形刀具，刀位点就是刀具的中心。在零件加工过程中，刀具和零件产生相对位移的刀具中心的路径，叫做刀具中心轨迹。显然，刀具中心轨迹是零件轮廓的等距线。

如前述，数学处理的主要任务是根据零件形状，按照已经确定的进给路线和允许的编程误差，计算出数控系统的输入数据，亦即零件轮廓上或刀具中心轨迹上一些点的坐标数据。具体包括以下计算。

1）基点和结点的计算。基点就是构成零件轮廓各相邻几何元素的交点或切点。例如圆弧与圆弧的交点或切点，直线与圆弧的交点或切点，两直线的交点等。

由于一般数控装置只具备直线插补和圆弧插补功能，当加工非圆曲线时，在满足允许编程误差条件下常用直线和圆弧去逼近。逼近线段的交点称为结点。编程就是要计算出各直线段长度和节点坐标值、各圆弧的起点、终点及圆心坐标值。

加工立体型面时，根据加工精度要求，用平行于某一坐标平面的一族平面，将型面分割成许多薄片，每个薄片外形轮廓都可视为平面曲线，为此也要计算出每一薄片外形轮廓曲线上的基点和节点坐标。

2）刀具中心轨迹的计算。数控铣床的控制系统要求程编给出刀具中心轨迹上的基点或结点的坐标数据，以控制刀心运动轨迹，由铣刀切削刃加工出零件轮廓。具有刀具偏移



表 9.8-5 钻孔程序卡

N	G	X	Y	Z	F	M	EOB	说 明
N001	G91G00	X2700	Y3000	Z－15000		M03	LF	快进到 *a* 点之上 150 mm 的点，主轴正转
N002				Z－14800			LF	快进到 *a* 点之上 2 mm 的位置
N003	G01			Z－1700	F－200		LF	以 200 mm/min 切削 *a* 点的孔
N004	G00			Z－1700			LF	快进，工具向上
N005		X1300	Y2000				LF	*b* 点之上 2 mm 快进定位
N006	G01			Z－1700			LF	以 N002 的 F200 在 *b* 点上钻孔
N007	G00			Z－1700			LF	
N008		X2000					LF	*c* 点定位
N009	G01			Z－1700			LF	*c* 点钻孔
N010	G00			Z－1700			LF	
N011		X1000	Y－1500				LF	*d* 点定位
N012	G01			Z－1700			LF	*d* 点钻孔
N013	G00			Z－1700			LF	
N014		X－5000	Y－4000	Z－14800		M02	LF	至原点上 150 mm，主轴停止

功能的控制系统程编时，实际上只需算出零件轮廓上的基点或结点坐标数据、给出刀具半径大小及刀具偏移指令，数控系统即可自动进行刀具偏移计算，算出所需的刀具中心轨迹坐标，控制刀具运动。对于没有刀具偏移运算的数控系统，则必须计算出铣刀中心轨迹的基点和结点，作为编程的依据。

3）辅助程序计算。对刀点到切入点（刀具开始与零件轮廓接触的点）的程序以及由切削终点返回到对刀点的程序都是辅助程序。在数值计算中也应算出辅助程序所需数据。

4）增量计算。增量坐标系统的数控装置输入的数据是增量坐标指令。对于直线段需算出直线终点相对于起点的坐标增量值；而对于圆弧段，一种是需算出圆弧终点相对于起点的坐标增量值及圆弧的圆心相对于圆弧起点的坐标增量值，另一种是需算出圆弧起点相对于圆心的坐标增量值及圆弧终点相对于圆心的坐标增量值。绝对坐标系统的数控装置输入的数据是绝对坐标指令。对于直线可直接给出它的终点坐标值；对于圆弧段，直接给出圆弧终点的坐标值，而圆弧起点仍用其相对于圆心的坐标增量给出，或用圆弧圆心相对于圆弧起点的坐标值给出。

按照上述规则，对于一段轮廓直线，若已算出它在零件坐标系里的起点坐标（x_i，y_i，z_i）和终点坐标（x_{i+1}，y_{i+1}，z_{i+1}），当按绝对坐标指令编程时，其插补程序书写格式为：

N△△△　G01…G90X$\{x_{i+1}\}$Y$\{y_{i+1}\}$…　（平面直线）

N△△△　G01…G90X$\{x_{i+1}\}$Y$\{y_{i+1}\}$Z$\{z_{i+1}\}$…　（空间直线）

当按增量坐标指令编程时，该直线插补程序为（工件相对于刀具的当前位置是直线的起点）

N△△△　G01…G91X$\{x_{i+1}-x_i\}$Y$\{y_{i+1}-y_i\}$…　（平面直线）

N△△△　G01…G91X$\{x_{i+1}-x_i\}$Y$\{y_{i+1}-y_i\}$Z$\{z_{i+1}-z_i\}$…　（空间直线）

上述各式中，G01、G90、G91 的意义见表 9.8－3。其中 G90、G91 对于具体的控制系统有时不一定要写。

对于圆弧轮廓，目前最为通用的编程方法是：用 *X*、*Y*、*Z* 表示圆弧段的终点坐标（在 G90 状态）或是圆弧终点到圆弧起点距离（在 G91 状态），用 I、J、K 分别表示圆弧中心相对于圆弧起点在 *X*、*Y*、*Z* 方向的坐标分量（即圆弧起点取为增量坐标的参考点），跨象限圆弧无需分段编程，只编成一个程序段即可。其程序书写格式为：

N△△△　G02G17G90X$\{x_{i+1}\}$Y$\{y_{i+1}\}$I$\{x_0-z_i\}$J$\{y_0-y_i\}$…

N△△△　G02G17G91X$\{x_{i+1}-x_i\}$Y$\{y_{i+1}-y_i\}$I$\{x_0-x_i\}$J$\{y_0-y_i\}$…

式中（x_i，y_i）、（x_{i+1}，y_{i+1}）、（x_0、y_0）分别为圆弧段起点、终点和圆心坐标。

在直线和圆弧插补程序中，除了指定坐标平面 G17、G18、G19 之外，还必须指定刀具偏置指令 G41 或 G42。这些指令以及 G02 的意义亦参见表 9.8-3。

下面举一简单例子说明圆弧插补指令的应用。

如果加工如图 9.8-27 所示的一个整圆，设起刀点在机床的原点，且编程原点与机床原点重合，加工时刀具从 *O* 点快速移到 *A* 点，由 *A* 点顺时针方向加工整圆又回到 *A* 点，再快速返回 *O* 点。这时，按绝对坐标编程的程序为

N001　G00G17G90X30Y0LF

N002　G02X30Y0I－30F100LF

N003　G00X0Y0M02LF

按相对坐标编程为

N001　G00G17G91X30Y0LF

N002　G02X0Y0I－30F100LF

N003　G00X－30Y0M02LF

因为是一个整圆，故终点与起点重合，终点相对于起点的坐标增量为零，因此 N002 中用 X0Y0 来给定终点的相对坐标值。

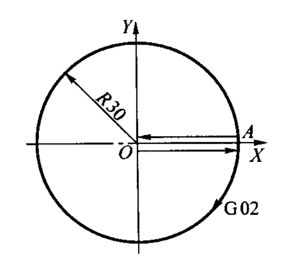


图 9.8-27 圆弧插补指令的应用

5）脉冲数计算。有些数控系统采用脉冲数输入方式。把零件轮廓和刀具中心轨迹上基点和结点的坐标值，除以相

应的脉冲当量，即换算成脉冲数。

直线、圆弧轮廓零件在机械零件中大约要占 80%～90%，是最常见的一类零件。所以这类零件的数控加工程序编制是轮廓控制的数控机床程编的基本形式。下面将通过一实例来介绍这类零件程编过程。

图 9.8-28 为铣削加工的工件。使用的 NC 机床具有刀具直径补偿和刀具偏置功能。其加工程序编制过程如下。

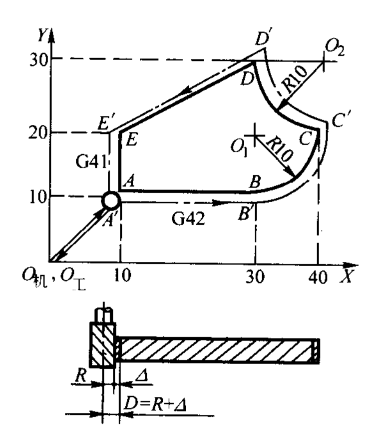


图 9.8-28 直线、圆弧零件的程序编制

首先对零件图进行工艺分析，并确定进给路线和工艺参数。如选用 $\phi16$ mm 立铣刀，主轴转速 $n=900$ r/min，切削进给速度 $F=100$ mm/min。使工件原点与机床原点重合。对刀点选在机床原点上。切削分粗、精加工两次进给。粗加工时，刀具中心在工件轮廓的法向偏离一个距离 D，$D=R+\Delta$，其中 R 为铣刀半径，Δ 为精铣时的加工余量；精加工时的刀具偏离距离应为刀具半径 R。

其次进行数值计算。计算步骤为：

① 根据零件轮廓特点与所确定的进给路线，将加工分成 5 个程序段，即 AB、BC、CD、DE 和 EA。

② 在工件坐标系里计算出基点 A、B、C、D、E 和圆心 O_1、O_2 的绝对坐标值。由于零件比较简单，这些点的坐标值可直接从图上得到。

③ 增量计算。根据零件尺寸标注方式，选用绝对坐标编制加工程序较为方便。因为对于直线段可直接给出它的终点坐标值，对于圆弧段，则给出圆弧终点坐标植，而圆弧起点用其相对于圆心的坐标增量给出。

机床数控系统可直接输入带小数点的十进制数，不需换算成脉冲数。

④ 辅助程序数据计算。切入程序是点 $O_{机}$ 到点 A 的直线段，切出程序是点 A 至点 $O_{机}$ 的直线段。需要求出这两直线段的终点坐标值。

⑤ 根据计算所得的全部数据及有关指令，编写加工程序：

```
     G92X0Y0
N001 G90G17G00G42D01X10Y10LF
N002 G01X30F100LF
N003 G03X40Y20I0J－10LF
N004 G02X30Y30I0J－10LF
N005 G01X10Y20LF
N006     Y10LF
N007 G00G40X0Y0M02LF
```

上程序中，程序段 G92X0Y0 完成工件坐标系到机床坐标系的变换。对于本例，由于这两个坐标系重合，所以 X、Y 后为零值。

G42 为刀具右偏指令。所谓右偏是指当沿刀具前进方向观察时，刀具偏在工件轮廓的右边。D01 为数控系统的内存地址，在运行程序进行加工之前，要用数控系统的手动键盘，将刀具中心的偏移量 D 送入到内存地址 D01 中去。加工时，机床根据按工件轮廓尺寸编制的加工程序和预先存放在数控系统内存中的刀具中心偏移量，自动计算刀具中心轨迹 $A'B'C'D'E'A'$，并控制刀具沿轨迹 $A'B'C'D'E'A'$ 进行加工。

N007 程序段的 G40 是撤销刀具半径补偿指令，因此本程序段和其后的程序段不作刀具半径补偿运算。G40、G42 都是续效代码。

6 APT 语言

最早研究数控自动编程系统的是美国。1952 年美国研制出世界上第一台数控铣床以后，美国麻省理工学院伺服机构试验室在美国空军的资助下，于 1953 年开始研究零件数控加工的自动编程问题。研究成果于 1955 年公布，这样便诞生了 APT（Automatical Programmed Tools，自动化编程工具)。以后经多次修改和完善，于 20 世纪 70 年代发展成 APT Ⅳ系统，并一直沿用至今。该系统能够在五坐标的范围内自动编制复杂零件的数控加工程序。在 APT 的基础上，世界各工业国都各自发展了各具特色的数控语言系统。如原联邦德国的 EXAPT、英国的 2CL、日本的 FAPT 和 HAPT、法国的 IFAPT、意大利的 MODAPT、前苏联的 CAJI 和 CJIC 以及我国的 SKC、ZCX 等。

现在，全世界实际应用而且比较著名的数控语言系统有 100 余种，但影响最深、应用最广、最具有代表性的要算 APT 系统。因此，本节将介绍 APT 的基本语法组成及零件源程序编制方法。

APT 语言的语句有四种类型，即几何定义语句、运动语句、后置处理语句和辅助语句。

6.1 几何定义语句

几何定义语句是为了描述零件的几何图形而设置的。一个零件是由各种几何元素所构成，零件加工时刀具沿着这些几何元素运动，因此要描述刀具运动轨迹，首先必须描述构成零件形状的各几何元素。

APT 的几何定义语句的一般形式是：

几何元素名字 = 几何元素类型/定义方式

该语句由三部分组成：第一部分为标识几何元素用的名字，名字可用 6 个以内的英文字母和数字组成，但至少要有一个英文字母，而且名字的用字不能与 APT 语言的词汇字相同。例如

P1 = POINT/5.0，4.0，0.0

表示名为 P1 的点的几何定义语句。

第二部分是标识几何元素种类的 APT 词汇字。除 POINT 之外，APT 包括的其他几何元素有 LINE、PLANE、CIRCLE 等。

第三部分是几何元素的定义方式。例如上例语句的点 P1 是用点的 X、Y、Z 三个坐标值给出的。

每种几何元素都是几种甚至十多种定义方式。在编写零件源程序时，程编人员可根据图纸数据给出情况，选择最方便的定义方式来定义几何元素。

例如定义一条直线，最简单的方法就是用通过该直线上的两个点给出：

L2 = LINE/P3，P4

如果感到用定义一条平行于某一已定义直线的新直线更方便，则可采用下面的语句：

L3 = LINE/P5，PARLEL，L3

这就是说直线 L3 必须通过点 P5，且平行于直线 L3。

定义一个平面只要通过这平面上的三个点就可以：



PL1 = PLANE/P1，P4，P5

当然，这里的 P1、P4、P5 不能在同一直线上。类似于上述平行直线语句，同样可以定义一个平面平行于另一个平面：

PL2 = PLANE/P2，PARLEL，PL1

平面 PL2 平行于平面 PL1，且通过点 P2。

一个圆可以由其圆心位置和半径来定义：

C1 = CIRCLE/CENTER，P1，RADIUS，10.0

应该指出，在上述几何定义中，虽然直线和圆属于两维图形，但 APT 系统处理这类几何元素时仍把它们当作三维图形处理。即直线是当作平面来处理的，认为该平面穿过直线并与 XY 坐标平面垂直；圆被认为是圆柱面，圆柱面穿过这个圆，并且圆柱的轴线垂直于 XY 坐标平面。

同时还应强调的是，在使用几何定义语句时必须遵循以下几条基本规则。

1）坐标数据必须按 X，Y，Z 的顺序给出。例如语句

P1 = POINT/5.0，4.0，0.0

将被 APT 程序理解为：$X=5.0$，$Y=4.0$，$Z=0.0$ 的一个点。

2）定义方式中出现的符号必须是在前面已定义过的。例如语句

P2 = POINT/INTOF，L1，L2

表示名为 P2 的点由直线 L1、L2 的交点给出。其中直线 L1 和 L2 必须已被定义过。

3）一个标识符仅能用来定义一个几何元素，亦即同一标识符不能用来定义两个不同的几何元素。所以，下列语句的表达是错误的：

P1 = POINT/INTOF，L1，L2

P1 = POINT/5.0，4.0，0.0

4）任一给定的几何元素只能用一个标识符来赋名。因此，在同一程序中，下列两个语句将使得程序出错：

P1 = POINT/0.0，0.0，0.0

P2 = POINT/0.0，0.0，0.0

5）在 APT 中定义的直线被认为两端是无限长的，平面被认为是无限大的，圆则被认为是一个完整的圆。

6.2 刀具运动语句

刀具运动语句是在源程序中用来描述刀具运动路线的语句。在一个 APT 零件源程序中，几何语句与运动语句占了程序的绝大部分。运动语句的一般格式为：

运动命令/描述数据

例如

GOTO/P1

语句由“/”分开的两部分组成。第一部分是基本运动命令，它告诉刀具如何运动。第二部分由描述数据组成，告诉刀具运动到哪里去。在上面的例句中，命令刀具运动到 P1 点，而 P1 点已在前面的几何语句中被定义。

在运动语句的开始，必须给出刀具的起始点，这是操作员工作开始前刀具定位的地方。零件编程员用下列语句指示这个起始位置：

FROM/TARG

FROM 是一个 APT 词汇字，它表明其他点将以此初始点为参考点。TARG 是给出的起始点的符号，任一其他的 APT 符号都能用于定义初始点。以上命令也可写成

FROM/0.0，－1.0，0.0

这里，描述数据就是初始点的 X，Y，Z 坐标值。

由于零件加工通常可区分为点位加工和轮廓加工，因此刀具的运动方式也就可以分成点位控制运动和轮廓控制运动。不同的刀具运动方式，其运动语句是不同的。

6.2.1 点位运动方式

刀具从某一规定位置直接作直线运动移动到另一规定位置称作点位程序控制。在 APT 语言中，完成点位控制运动的语句只有两种：GOTO 和 GODLTA。GOTO 语句就是让刀具的顶端（中心）移动到后面描述数据所指定的点处。点是按绝对坐标数据或已定义过的点名等来表示的。例如：

GOTO/P2

GOTO/3.0，4.0，1.0

在第一句中，P2 是刀具中心的目标点，要求刀具移动到这一点。在第二句中，要求刀具运动到 $X=3.0$，$Y=4.0$，$Z=1.0$ 的位置上。

GODLTA 命令规定刀具从当前位置移动一个距离增量。例如语句

GODLTA/2.0，5.0，0.0

指示刀具从它的当前位置向 X 正向移动 2 mm，向 Y 正向移动 5 mm，而 Z 坐标保持不变。

GODLTA 命令对钻削之类的加工很有用。例如欲加工的孔在点 P2 处，可首先用 GOTO 语句指示刀具移动到点 P2，然后使用 GODLTA 命令钻这个孔。其语句顺序如下：

GOTO/P2

GODLTA/0，0，－15

GODLTA/0，0，＋15

例 写出完成图 9.8-29 所示零件钻孔所必需的 APT 几何定义语句和运动语句。零件的厚度为 15 mm。

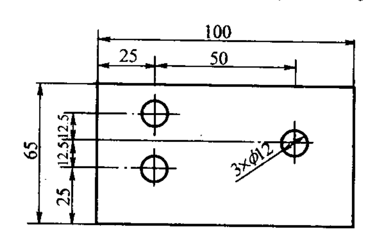


图 9.8-29 板状零件

在设置坐标系和零件上三个孔的标号后，该零件图如图 9.8-30 所示。我们将坐标平面 $Z=0$ 定义在零件表面之上 5 mm处。图中点 P0（－25，75，40）为对刀点。

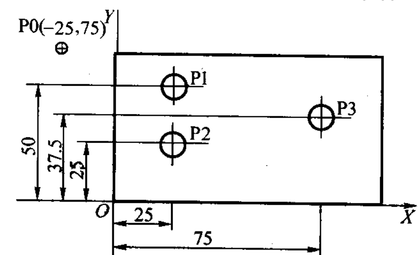


图 9.8-30 建立坐标系并对三孔标号

按照加工要求，可以写出如下程序：

P1 = POINT/25，50，0	点 P1 的坐标是 $X=25$，$Y=50$，$Z=0$
P2 = POINT/25，25，0	点 P2 的坐标是 $X=25$，$Y=25$，$Z=0$
P3 = POINT/75，37.5，0	点 P3 的坐标是 $X=75$，$Y=37.5$，$Z=0$
P0 = POINT/－25,75,40	对刀点的位置 $X=-25,Y=75,Z=40$
FROM/P0	指定起刀点
GOTO/P1	刀具移动到点 P1
GODLTA/0，0，－25	在 P1 点上钻孔
GODLTA/0，0，＋25	刀具向上
COTO/P2	刀具移动到点 P2
GODLTA/0，0，－25	在 P2 点上钻孔
GODLTA/0，0，＋25	刀具向上
GOTO/P3	刀具移动到点 P3
GODLTA/0，0，－25	在 P3 点上钻孔
GODLTA/0，0，＋25	刀具向上

GOTO/P0　　　　　　　刀具回到对刀点 P0

由于上述程序没有包括必要的辅助语句和后置语句，所以不是一个完整的 APT 程序。然而，语句顺序说明了几何定义语句和运动语句应如何组合，以指示刀具完成一系列的加工步骤。

6.2.2 轮廓控制方式

1）三个控制面的定义。在这种方式中，由于必须对刀具的运动进行连续控制，因此轮廓控制运动命令就必然要复杂些。而要完成这种连续控制，或者说为了得到惟一的刀具运动轨迹，就需要确定刀具相对于工件的位置关系，其中包括刀具在其轴心线方向上与工件的位置关系，在垂直于轴心线的面上沿着什么样的轨迹运动，运动到什么地方停止等。为此在 APT 系统中定义了三个控制面。

① 零件面 PS（part surface）：它是在加工过程中与刀具顶端始终保持接触的一个表面，它控制刀具切削的深度（见图 9.8-31）。应该注意，零件面可能是，也可能不是工件的实际表面。零件面一经指定，对后续语句就一直有效，直到被其他指定零件面的语句重新指定为止。

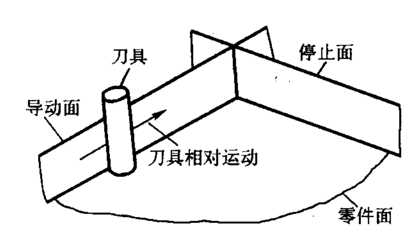


图 9.8-31　轮廓控制运动中引导刀具的三个曲面

②导动面 DS（drive surface）：它是在进行指定的切削运动过程中，引导刀具保持在指定公差范围内运动的面。该面与刀具进给运动方向平行。刀具相对于导动面 DS 的位置由如下三个修饰词表示（图 9.8-32）：

TLLFT（刀具在左）

TLRGT（刀具在右）

TLON（刀具在线上）

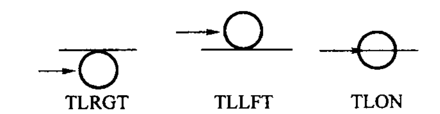


图 9.8-32　刀具相对于导动面 DS 的位置

顺着刀具运动方向看，刀具左切导动面时为 TLLFT，刀具右切导动面时为 TLRGT，刀具轴线落在导动面上为 TLON。

导动面 DS 应在初始运动语句和连续切削运动语句中予以指定。

③停止面 DS（check surface）：它是用来限制刀具继续向前运动的面。刀具到达停止面，表示该运动语句执行完毕，可转入执行下一运动语句。

刀具移动时，由一对控制面，即导动面 DS 和零件面 PS，得到刀具的轨迹。刀具继续运动到第三个控制面，即停止面 CS 时，就停止运动或转下一运动。因此，在连续运动中，刀具总是沿着一个控制面运动到下一个控制面。刀具当前沿着它运动的控制面就是导动面，刀具沿导动面运动将要到达的下一个控制面就是停止面，而且前一运动语句的停止面必为下一运动语句的导动面。如图 9.8-33 所示，对刀具运动 1 来说，表面 *A* 是导动面，表面 *B* 是停止面；对运动 2 来说表面 *B* 为导动面，而表面 *C* 是停止面，如此等等。

为了说明并区别刀具由导动面到达停止面时，与停止面的接触状态，需要用到下面五个修饰词（图 9.8-34）：

TO（走到）——刀具刚好与停止面相切；

ON（走上）——刀具中心刚好停在停止面上；

PAST（走过）——刀具越过停止面并与之相切；

TANTO（走切）——刀具停在导动面与停止面的切点上；

PSTAN（切于零件面）——刀具停在零件面与停止面的切点上。

停止面在初始运动语句和连续切削运动语句中予以指定。

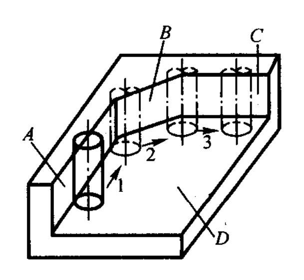
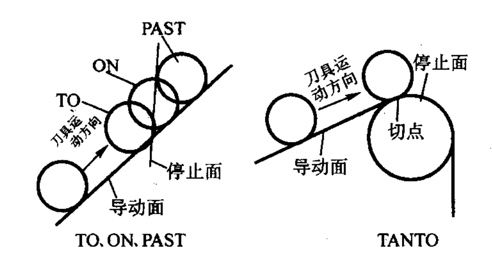


图 9.8-33　刀具运动和控制面

2）初始运动语句。进行连续切削之前，除了同样需要指定刀具的起始位置（起刀点）以外，为了使刀具沿着指定的控制面运动，还必须使用初始运动语句将刀具从远离加工表面的位置（起刀点）引导到两个或三个控制面的容差带之内。初始运动语句的一般形式是：

$$\text{GO/}\left\{\begin{matrix}\text{TO}\\\text{ON}\\\text{PAST}\end{matrix}\right\},\ \text{DS},\ \left\{\begin{matrix}\text{TO}\\\text{ON}\\\text{PAST}\end{matrix}\right\},\ \text{PS},\ \left\{\begin{matrix}\text{TO}\\\text{ON}\\\text{PAST}\end{matrix}\right\},\ \text{CS}$$

其是最后一项停止面 CS 有时可以省略。这时刀具将沿最短距离路线从起刀点移动到前两个控制面所限定的位置。



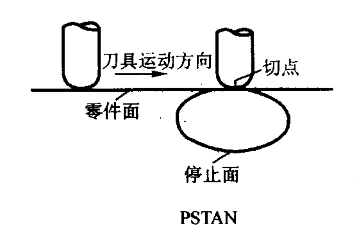


图 9.8-34　刀具与停止面的相对位置

必须注意，初始运动语句中三个控制面的表达顺序为导动面、零件面、停止面，不能随意颠倒。

括号内是修饰词，它表示刀具相对于控制面的关系，其含意已于前述，下面再举一例说明。

FROM/SETPT

GO/ON，S1，TO，S2，PAST，S3

该两语句表示：调整到名为 SETPT 点（起刀点）上的刀具，根据初始运动语句的命令进给，其位置对于面 S1，刀具中心在此面上（ON）；对面 S2，刀具与之相切（TO）；对 S3，刀具走过但相接触（PAST）。S1 是下一个运动的导动面，S2 是零件面，S3 为初始运动的停止面。

如果只指定 DS、PS 两个面而又不允许刀具沿最短路线前进，此时就应在初始运动语句前加写如下语句，使刀具通过已知点（POINT1）或已知矢量（VECTOR1）来限定刀具的前进方向（参见图 9.8-36）

INDIRP/POINT1

INDIRV/VECTOR1

必须指出，GO/TO 命令与 GOTO 命令是不同的。GOTO 仅用于点位控制加工，而 GO/TO 是用作轮廓控制运动指令串的初始运动语句。

3）轮廓加工语句。当用 GO/语句对刀具初始运动作了规定之后，以后的刀具运动需要用轮廓加工语句来规定。轮廓加工语句使刀具沿着两个控制面运动到第三个控制面。语句的书写格式如下：

$$\left\{\begin{matrix}\text{GOUP}\\ \text{GOFWD}\\ \text{GOLFT}\\ \text{GORGT}\\ \text{GOBACK}\\ \text{GODOWN}\end{matrix}\right\}\text{/DS,}\quad \left\{\begin{matrix}\text{TO}\\ \text{ON}\\ \text{PAST}\\ \text{TANTO}\\ \text{PSTAN}\end{matrix}\right\}\text{, CS}$$

由于初始运动语句中给定的零件面 PS 对以后的语句都有效，所以轮廓加工语句中只需给出导动面和停止面。导动面 DS 之前要用方向指示词指出刀具从上次进给运动转入本次进给运动时的前进方向，如 GOUP（向上）、GOFWD（向前）、GOLFT（向左）、GORGT（向右）、GOBACK（向后）、GODOWN（向下）等，它们都是沿前一次运动的方向观察来决定的（见图 9.8-35）。

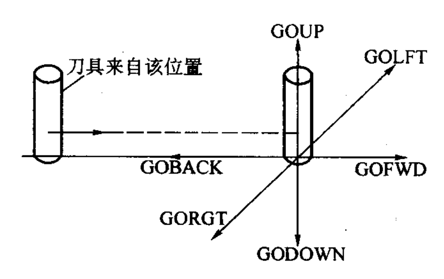


图 9.8-35　刀具运动方向的指定

当加工过程中需要改变零件面 PS 时，可以使用 PSIS（Part Surface IS）语句。

图 9.8-36 所示是一综合示例。该例中刀具运动的指令串书写如下：

FROM/P1	起刀点是 P1
INDRIV/V1	刀具按 V1 方向运动
GO/PAST，PL1，TO，PL3	GO/规定 PL3 为零件面 PS
GOLFT/PL1，TO，PL2	刀具沿 PL1 在 PL3 上滑动到 PL2 止
PSIS/PL2	PL2 变为零件面 PS
GODOWN/PL3，TO，PL4	刀具沿 PL3 向下运动到 PL4 止
GOFWD/PL4	刀具沿 PL4 继续向前运动

由上面语句可以看出，在这个例子中，刀具是从起刀点 P1 按 V1 规定的方向运动到 GO/语句所指定的导动面（PL1）及零件面（PL3）的容差范围内的，而不是按最短距离路线移动到该位置上；若要改变 GO/语句所指定的零件面，必须用 PSIS/语句规定新的零件面。

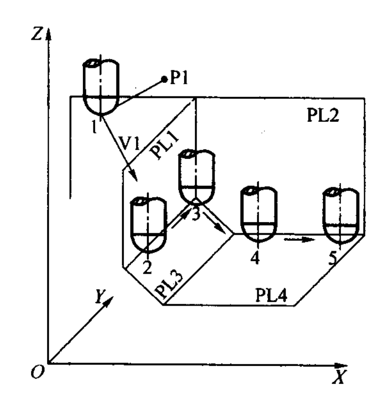


图 9.8-36　轮廓加工的刀具运动语句串

6.3　后置处理程序语句

由 APT 系统产生的刀具轨迹数据（刀位文件）是在假定工件静止、刀具移动的前提下得到的一般解。但是，这个假设不一定符合机床实际情况。把一般解处理成适合于特定的机床或数控装置的程序称为后置处理程序。后置处理程序的主要功能是将刀位文件转换成机床能够接受的代码，如 S 代码、F 代码、M 代码等。主要的后置处理程序语句如下。

1）MACHIN/后置名。该语句用来指定所用后置处理程序，其中后置名是一个标识符，为所用的后置处理程序的名字。

2）FEDRAT/数。该语句用来指定刀具的进给速度，句中的数表示机床的进给速度（mm/min）或进给速度代码。

3）SPINDL/。该语句用来指定机床主轴的转速（n）、旋转方向（CLW 或 CCLW）或启停状态。其形式为

$$\text{SPINDL}/n,\ \left\{\begin{matrix}\text{CLW}\\ \text{CCLW}\\ \text{OFF}\end{matrix}\right\}$$

4）COOLNT/。此语句指示切削液的状态。语句格式为

$$\text{COOLNT/}\left\{\begin{matrix}\text{FLOOD}\\ \text{MIST}\\ \text{OFF}\end{matrix}\right\}$$

式中，FLOOD 表示液冷开；MIST 表示雾冷开；OFF 为切断切削液。

5）STOP。该语句的作用是使机床停止加工，此时可更换刀具或进行工件检测，但控制机仍处于工作状态。

6）END。该语句不仅使机床停止工作，而且控制机也停止工作。

7）TRANS/X，Y，Z。图 9.8-37 所示为装夹在机床工作台上的零件。XYZ 为编程时在工件上设定的坐标系，$X'Y'Z'$ 为机床上设定的坐标。通常工件坐标系与机床坐标系并不重合。如图中点 A 的坐标，按工件坐标系是（2，1，0），而按机床坐标系则是（8，3，0）。工件加工时，必须将作为一般解的刀位数据（定义在工件坐标系中）表示在机床坐标系中，语句 TRANS/X，Y，Z 即完成此坐标变换，其中 X，Y，Z 的数值就是机床坐标系的原点 O' 在工件系中的坐标值。对于图 9.8-37 所示的情形，此语句为

TRANS/ −6，−2，0

图 9.8-37　工件坐标系和机床坐标系

6.4　辅助语句

完整的APT程序还必须包括各种其他语句，称为辅助语句。最常用的几个辅助语句如下。

(1) 指定刀具形状的语句

CUTTER/D，r

式中D和r分别为圆柱铣刀直径和圆角半径（图9.8-38）。

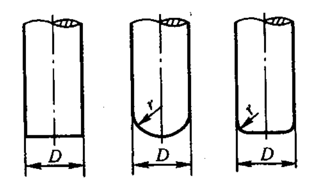


图9.8-38　刀具形状的定义

(2) 指定容差的语句

APT系统对于任何曲线均用直线段逼近，它偏离真实曲线的差值是通过源程序中的容差语句来指定。容差值规定得愈小，则加工出的轮廓愈接近所希望的理论曲线，但运算时间长，加工程序亦长。所以，应按加工精度的要求，规定合适的容差值。

在零件源程序中规定容许误差的语句如下。

1) OUTTOL/t。句中t为理论曲线与刀具所描绘的直线段之间的最大偏差，亦即表示允许零件表面留下的最大毛坯余量（图9.8-39a），称为外容差。

2) INTOL/t。该语句中t表示允许刀具可以切入零件表面的量（图9.8-39b），称为内容差。

若同时指定OUTTOL和INTOL，此时偏到理论曲线外侧部分按OUTTOL规定容差，偏到内侧的按INTOL规定容差（图9.8-39c）。

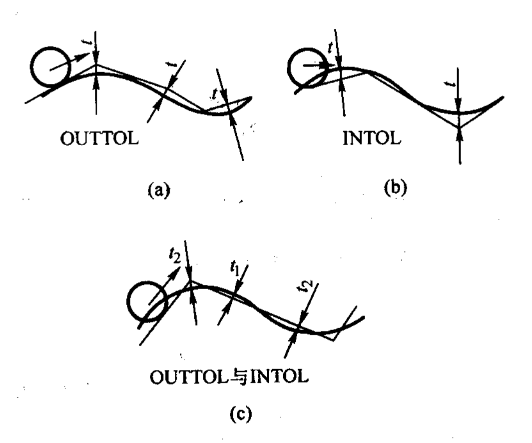


图9.8-39　容许误差的指定

OUTTOL和INTOL一经指定，直到再指定之前都是有效的。

由于APT系统的主要目的就是求不断变化的刀具轨迹的位置，即计算刀位点的坐标值。因此，在书写运动语句之前，应先写出指定刀具形状和容差大小的语句。

3) 程序结束命令语句。零件源程序写完后，最后必须写上FINI语句。否则APT系统就会将后续的零件源程序作为当前程序的继续加以处理，因而造成错误。

由于语句STOP和END不是指示程序的结束，因此不用STOP或END来代替FINI。

4) 其他辅助语句。

PARTNO——用于程序的开头以标识零件程序。

CLPRNT——打印出刀具中心轨迹数据。

REMARK（或$ $）——用以指明该语句后的句子为注释语句。

6.5　APT语言应用实例

前几节介绍了应用APT语言编写零件源程序要用到的基本知识。本节将利用这些基本知识，编制一个零件的源程序，并说明其编写方法和步骤。

图9.8-40为由直线与圆弧组成的零件，其零件源程序的编写方法和步骤如下：

1) 选择坐标系和确定各有关几何元素的标识符号。选择程编坐标系时，要考虑使程编方便，图样尺寸换算工作量小。确定有关几何元素的标识符号，就是给各几何元素取个名称，并将这些名字记入零件图样。如图9.8-41所示，点为P1、P2、P3、P4，直线为L1、L2、L3，圆为C1，平面为PL1。

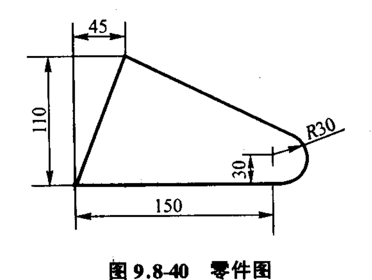


图9.8-40　零件图

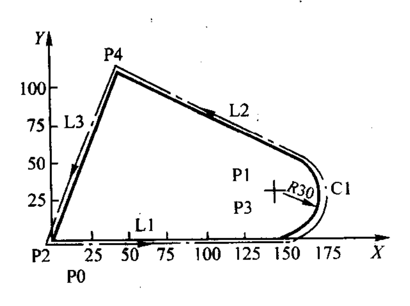


图9.8-41　几何定义及走刀路线图

2) 书写几何定义语句。按照APT的几何定义功能书写出各几何定义语句。应注意的是，凡是后面要用到的任何标识符，事先必须定义，否则将出现语法错误。因此，为避免漏定义，几何语句的书写应遵循一定的次序。

3) 确定对刀点和对刀方法。本例是在夹具上设置一个对刀销钉，以该销钉中心PO点的位置作为程序的起点，见图9.8-41（图中销钉未画出）。

采用对刀销钉对刀，其方法与对刀孔对刀相同，即同样用千分表随主轴转动方法找正对刀点。

4) 选择刀具、容差等工艺参数。在书写刀具运动语句之前应把工艺参数语句写在程序里。工艺参数语句具有续效性，若要变更，需重新指定。

5) 编写刀具运动语句。严格按照图9.8-41所示的加工路线的顺序，逐条写出刀具运动语句。

6) 插入其他语句。根据数控装置和机床的种类，指定选用何种后置处理程序；指定刀具的进给速度、主轴的回转速度、切削液的开与关等；在程序开始处书写零件源程序的名称；在适当位置书写刀位数据的打印命令；在零件源程序结束时写上结束命令。

7) 检查有无语法错误。

零件复杂时最容易出现漏定义漏加工的情况。因此可在书写几何定义语句的同时，另外写出运动语句，待所有的几何元素都定义好以后，就可将两者放在一起进行对照检查：即查看是否所有表面都已加工到，也检查所用的标识符是否都已定义过。采用这样的方法就不容易遗漏。

最后，将源程序输入到具有 APT 程序系统的计算机中进行处理，并可检查打印出来的处理结果的清单。

APT 系统本身有很强的诊断功能，能自动诊断出源程序中的错误，所以程编人员能根据诊断出的问题，很快地改正错误。

下面就是按照上述方法和步骤编写出的图 9.8-40 所示零件的 APT 源程序。

```
PARTNO  TEMPLATE                              初始语句，说明加工对象是样板。
        MACHIN/F7M                            后置处理语句，说明控制机型号。
        CLPRNT                                说明需要打印刀位数据清单。
        INTOL/0.01                            指定用直线段逼近零
        OUTTOL/0.01                           件轮廓的容许误差。
        CUTTER/10                             说明选用平头立铣刀，直径为 10 mm。
        $ $ DEFINITION                        作注释语句用，表明以下为几何定义语句。
        P0 = POINT/0, -25, 0
        P1 = POINT/150, 30, 0
        P2 = POINT/0, 0, 0
        P3 = POINT/150, 0, 0
        P4 = POINT/45, 110
        L1 = LINE/P2, P3
        C1 = CIRCLE/CENTER, P1, RADIUS, 30
        L2 = LINE/P4, LEFT, TANTO, C1
        L3 = LINE/P2, P4
        PL1 = P2, P3, P4
        SPINDL/900, CLW                       主轴转速 n = 900 r/min，顺时针旋转。
        FEDRAT/50                             选用进给速度为 50 mm/min。
        COOLNT/ON                             切削液开。
        FROM/P0                               指定起刀点。
        GO/TO, L1, TO, PL1, TO, L3            初始运动指令。
        GORGT/L1, TANTO, C1                   以下说明进给路线。
        GOFWD/C1, PAST, L2
        GOFWD/L2, PAST, L3
        GOLFT/L3, PAST, L1
        COOLNT/OFF                            切削液关闭。
        FEDRAT/500
        GOTO/P0                               回到起刀点。
        FINI                                  零件源程序结束。
```

7 数控线切割加工程序的编制

7.1 数控线切割编程中的工艺处理

（1）偏移量 f 的确定

编程时首先要确定金属丝中心运动轨迹与切割轨迹之间的偏移量 f。f 为金属丝半径和单边放电间隙之和。

放电间隙 Z 与工件的材料、结构、走丝速度、金属丝的张紧状况、导轮的运行状态、工作液种类、供应状况及脏污程度、加工电源的电规准、以及加工变频调节等情况有关。采用快速走丝机构，在 $v_{空} = 60 \sim 80$ V 时，一般 $Z = 0.01 \sim 0.02$ mm。

在实际工作中，为了准确地确定 f 值，放电间隙有时需通过切割一正方形试件后实测得到。

（2）取件位置、切割路线走向及起点的选择

为了避免工件材料内部组织及内应力对加工精度的影响，必须考虑工件在坯料中的取出位置，合理选择切割路线的走向和起点。

例如在切割热处理性能较差的材料时，若工件取自坯料的边缘处（图 9.8-42a），则变形较大；若工件取自坯料的里侧（图 9.8-42b），则变形较小。所以，为保证加工精度，必须限制取件位置。

切割路线的走向和起点选择不当，也会严重影响工件的加工精度。如图 9.8-43 所示，加工程序引入点为 A，起点为 a，则切割路线走向可有：

1）$A \to a \to b \to c \to d \to e \to f \to a \to A$；

2）$A \to a \to f \to e \to d \to c \to b \to a \to A$。

如选 2）走向，则在切割过程中，工件和易变形的部分相连接，会带来较大的误差；如选 1）走向，就可减少或避免这种影响。

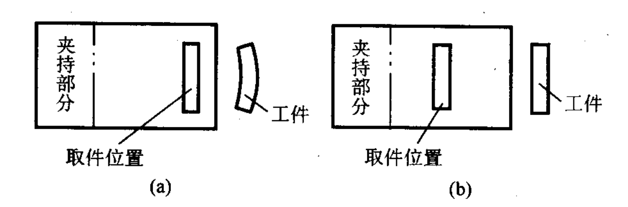


图 9.8-42 取件位置对工件精度的影响

若加工程序引入点为 B，起点为 a，这时无论选哪种走向，其切割精度都会受到材料变形的影响。

程序起点（一般也是终点）选择不当，会在工件切割表面上残留切痕，尤其起（终）点是选择在圆滑表面上时，其残痕更为明显。所以，应尽可能把起（终）点选在切割表面

的拐角处，或选在精度要求不高的表面上，或选在容易修整的表面上。

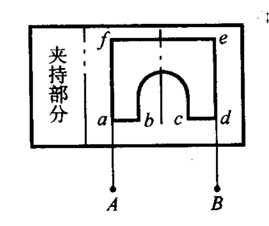
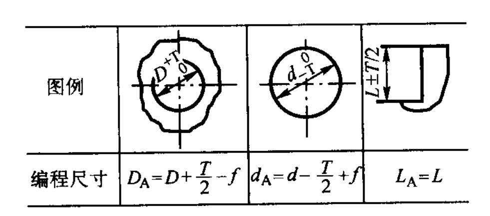


图 9.8-43　切割路线走向及起点对加工精度的影响

(3) 切割轨迹的确定

金属丝切割轨迹（即所得工件的轮廓线）应选在工件尺寸公差带的什么位置上，可区分成以下三种情况来考虑：

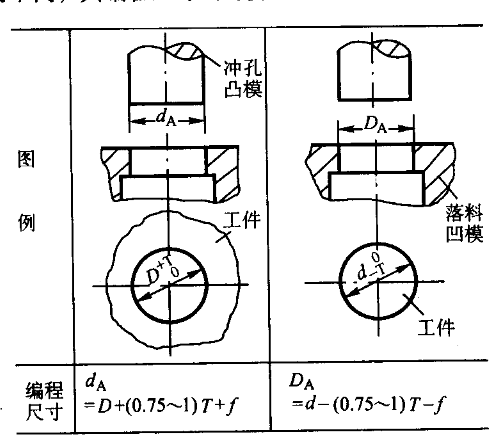
1) 直接加工零件时，应使钼丝切割轨迹通过公差带中心。如图 9.8-44 所示，按照工件尺寸性质不同，编程尺寸也不相同。



图例	D^{+T}_{0}	d^{0}_{-T}	$L\pm T/2$
编程尺寸	$D_A=D+\frac{T}{2}-f$	$d_A=d-\frac{T}{2}+f$	$L_A=L$

图 9.8-44　切割轨迹通过公差带中心时的编程尺寸

2) 加工冷冲模的凸凹模时，为了延长模具的使用寿命，应使切割轨迹偏离公差带中心。如图 9.8-45 所示，按加工情况的不同，其编程尺寸的计算也不同。



图例	冲孔凸模；d_A；工件；D^{+T}_{0}	D_A；落料凹模；d^{0}_{-T}；工件
编程尺寸	$d_A=D+(0.75\sim1)T+f$	$D_A=d-(0.75\sim1)T-f$

图 9.8-45　冷冲模的编程尺寸

3) 当线切割需分粗、精两次完成，或者需要对线切割表面后续采用其他方法加工时，就要求粗加工时为精加工（或后续加工）留有一定余量，即需加大偏移量 f 值。故粗加工时的偏移量

$$f=\frac{1}{2}d_{丝}+Z+\Delta$$

式中，$d_{丝}$ 为钼丝直径；Z 放电间隙；Δ 为精加工（或后续加工）余量。

(4) 零件定位方式的确定与夹具选择

1) 适当的定位可以简化编程工作。工件在机床工作台上的位置影响工件轮廓线的方位，因而影响各节点坐标的计算过程和结果。例如，对图 9.8-46 所示的工件，当 α 角为 0°、90°或 45°时，各节点的计算就比较简单，计算也就不容易出错（对手工编程而言）。

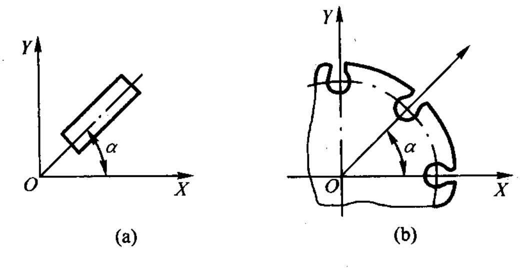


图 9.8-46　工件定位对编程的影响

2) 夹具对编程的影响　采用适当的夹具，或可使编程简化，或可用一般编程方法使加工范围扩大。如用固定分度夹具，用一段程序带可以加工零件的多个回转图形，这就简化了编程工作。再如用自动回转卡盘，变原来的直角坐标系为极坐标系，可用切斜线的程序，加工出近似的阿基米德螺旋面；还可以用适当的夹具，加工出导轮的沟槽、样板的椭圆线和双曲线等，这就扩大了线切割机的使用范围。

(5) 辅助程序的规划

辅助程序一般有以下几种。

1) 引入程序。程序起点是在切割轨迹的某个结点上，如图 9.8-43 之 a 点。在开始切割时，引入点（如图 9.8-43 中之 A 点）通常不能与起点重合，这就需要一段引入程序。引入点有时可选在材料实体之外（如大多数凸模的加工）；有时也选在材料实体之内（如凹模加工）。这时就需要预制工艺孔，以便穿丝。

如上所述，为了控制加工过程中的材料变形，应合理选择引入点和引入程序。此外，引入点应尽量靠近程序的起点，以缩短切割时间。

2) 切出程序。有时工件轮廓切完之后，金属丝还需沿切入路线反向切出。如图 9.8-47 所示，如果材料的变形使切口闭合，当金属丝切至边缘时，会因材料的变形而卡断钼丝。这时应在切出过程中，增加一段保护钼丝的切出程序（见图 9.8-47 中 $A'-A''$）。A'点距材料边缘的距离，应依变形力大小而定，一般有 1 mm 左右即可。$A'-A''$斜度可取 1/3 ~ 1/4。

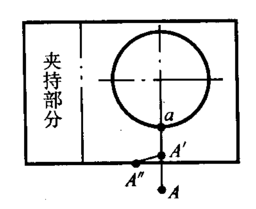


图 9.8-47　切出程序

3) 超切程序和回退程序　金属丝是个柔性体，加工时受放电压力、工作液压力等的作用，会造成加工区间的钼丝，滞后于上、下支点一个距离，即金属丝工作段会发生挠曲（见图 9.8-48a）。这样就会抹去工件轮廓的清角，影响加工质量（见图 9.8-48b）。为了避免抹去清角，可增加一段超切程序，如图 9.8-48b 中的 $A-A'$段，使金属丝切割的最大滞后点达到程序节点 A，然后再辅加 A'点返回 A 点的回退程序 $A'-A$。接着再执行原程序，便可割出清角。

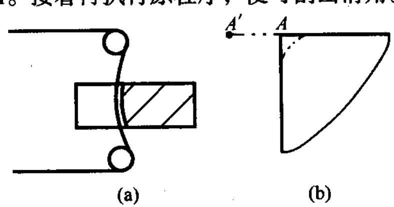


图 9.8-48　加工时钼丝挠曲及其影响



7.2 数控线切割加工的程序编制

7.2.1 程序编制的基本规则

1）如前所述，编制程序时必须符合一定的格式。例如，国内一些数字程序控制线切割机的3B程序格式见表9.8-6。

表9.8-6　3B程序格式

B	X	B	Y	B	J	G	Z
分隔符	X坐标值	分隔符	Y坐标值	分隔符	计数长度	计数方向	加工指令

表中 B 为分隔符号，因 X、Y、J 均为数码，需用 B 将它们区分开来。

2）加工圆弧时，坐标原点取在圆心，X，Y 为圆弧起点坐标值；加工斜线时，坐标原点取在斜线起点，X、Y 为斜线终点坐标值，并允许将 X 及 Y 坐标值按相同的比例缩小和放大。

在一个工件的加工过程中，X、Y 坐标轴的方向应始终保持不变，即为机床的 X 拖板和 Y 拖板的运动方向。加工不同的曲线时，取不同的坐标原点，只是坐标平移。

3）选取 X 拖板方向进给总长来进行计数的称为计 X，用 G_x 表示。选取 Y 拖板进给总长度来进行计数的称为计 Y，用 G_y 表示。为了保证加工精度，必须正确选择计数方向。如图9.8-49a所示，当斜线在阴影区域内，计数方向取 G_y，否则应取 G_x；如图9.8-49b所示，若圆弧的加工终点在阴影部分，则计数方向取 G_x，否则应取 G_y。

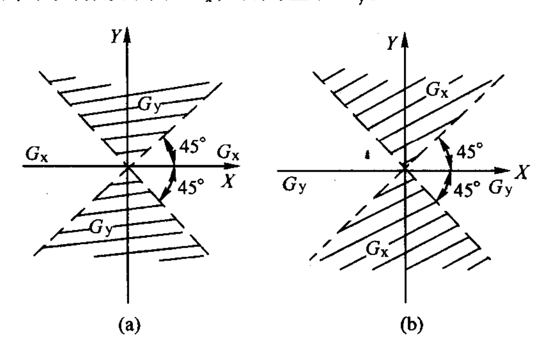


图9.8-49　计数方向选择

4）计数长度 J 应取从起点到终点某个方向拖板移动总距离。当计数方向确定后，就是被加工曲线（直线）在该方向投影长度的总和。图9.8-50说明了圆弧计数长度的计算。

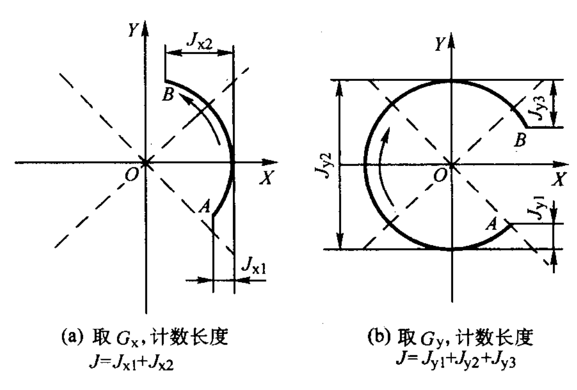
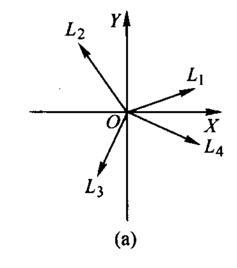


图9.8-50　圆弧计数长度计算

5）X、Y、J 数值均以 μm 为单位。编制程序的计算误差应小于1 μm。当 X 或 Y 为零时，可以不写。对于计数长度 J，则应写足六位数，如 J = 1 732 μm，应写成001732。

6）加工指令共有12种，如图9.8-51所示。



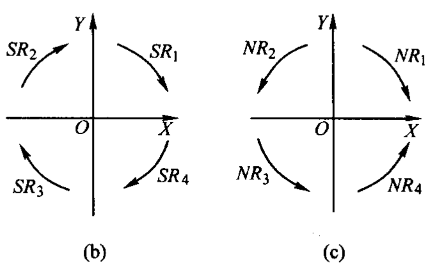


图9.8-51　加工指令

当被加工的斜线在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ象限时，分别用 L_1、L_2、L_3、L_4 表示（图9.8-51a）。

对于平行于坐标轴方向的线，为了区别于一般的斜线，把它称为直线，根据进给方向，直线加工指令的选取按图9.8-52的规定，且此时程序中应取 $X = Y = 0$。

当被加工的圆弧在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ象限，加工点按顺时针方向运动时，分别用 SR_1、SR_2、SR_3、SR_4 表示（图9.8-51b）；当被加工的圆弧在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ象限，加工点按逆时针方向运动时，分别用 NR_1、NR_2、NR_3、NR_4 表示（图9.8-51c）。

圆弧可能跨越几个象限，此时加工指令应由起点所在的象限和圆弧走向决定。例如加工图9.8-50a中的圆弧 $\overset{\frown}{AB}$ 时，加工指令为 NR_4；加工图9.8-50b中的圆弧 $\overset{\frown}{AB}$ 时，加工指令为 SR_4。

7.2.2 编程实例

例　在数控线切割机床上加工图9.8-53所示的样板，其轮廓为 *abcdfg*，机床脉冲当量为0.001 mm/脉冲，编制其程序。

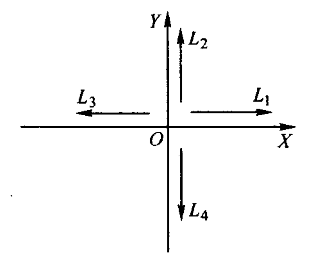


图9.8-52　直线加工指令

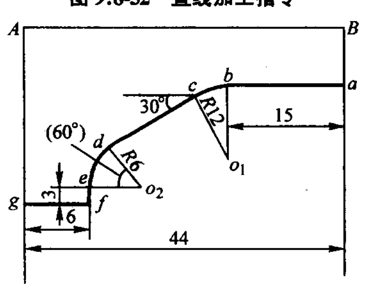


图9.8-53　样板

首先确定偏移量 f。用 ϕ0.12 mm的钼丝加工，放电间隙取经验值 Z = 0.01 mm，所以 f = 0.07 mm。

假定机床具有间隙补偿功能，切割路线的走向为 $a \rightarrow b$



$\to c\to d\to e\to f\to g$。根据上述编程规则就可编写出样板的加工程序（见表 9.8-7）。

表 9.8-7　样板加工程序单

序号	程序段	X		Y		J		G	Z
1	$a-b$	B	0	B	0	B	15 000	G_x	L_3
2	$b-c$	B	0	B	12 000	B	6 000	G_x	NR_2
3	$c-d$	B	14 000	B	8 080	B	14 000	G_x	L_3
4	$d-e$	B	3 000	B	5 190	B	5 190	G_y	NR_2
5	$e-f$	B	0	B	0	B	3 000	G_y	L_4
6	$f-g$	B	0	B	0	B	6 000	G_x	L_3
		D							

表中 D 为停机码，供整个工件加工完毕后发“停机”命令用。

8　冲裁模线切割的自动编程

用数控线切割加工冲模，具有加工精度高、生产效率高及对加工操作技术熟练程度的要求较低等优点。所以，冲裁模中的凸模、凹模、凸凹模以及卸料板、固定板等均用线切割加工。但在加工模具前，必须根据模具图样算出金属丝中心切割运动轨迹，即求出各轨迹段交点坐标以及确定计数方向与长度等，然后编出数控程序，因此很费时间，而且容易出错。若采用计算机辅助编程，实现 CAD/CAM 的一体化，不仅可以大大缩短编程时间，而且对于提高线切割机加工模具的速度和质量，也具有重要意义。

用计算机实现数控线切割机自动编程，首先根据图形信息，自动选取合理的穿丝孔位置、穿丝孔孔径和起割点位置。然后根据金属丝直径和放电间隙、凸凹模刃口间隙等，确定金属丝中心相对于图形形状的偏置量，生成金属丝运动轨迹和相应的数控加工指令。

8.1　生成金属丝运动轨迹

在切割凹模时，金属丝中心的轨迹应在要求加工图形的里面；切割凸模时，金属丝中心的轨迹应在加工图形的外面，如图 9.8-54 中的虚线所示。因此，只要将图形放大（切割凸模）或缩小（切凹模）即可求得钼丝中心的轨迹。放大或缩小量包括金属丝半径加上电火花放电间隙和凸模与凹模间的间隙。

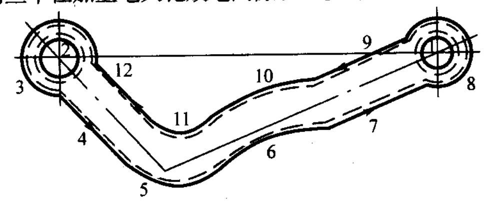


图 9.8-54　图形顺序向量化示意

首先将输入的图形信息进行几何元素的顺序化、表征参数的标准和向量处理，然后转换成一个有序表（表 9.8-8）。

实现数控线切割机的计算机辅助编程的各种几何计算，归纳为对这一表格的处理。表中 A、B、C 为各线段表征参数，T 为线型标志。每一行包含了一个几何元素的基本信息。这样归纳的结果，不仅使程序的设计简化，而且不需进行方向和三角函数运算，提高了计算机对图形的处理速度。

表 9.8-8　图形几何信息的参数化表征

起点坐标		表征参数			
x_1	y_1	A_1	B_1	C_1	T_1
x_2	y_2	A_2	B_2	C_2	T_2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

8.2　穿丝孔和起割点的自动选取

线切割加工前，需根据工件图形大小和特点选取起割点（也是切割终点），打出穿丝孔。起割点位置和穿丝孔位置的大小，直接影响到加工难度和切割终点处的表面粗糙度。为了合理选取起割点位置、穿丝孔位置和孔径，建议考虑下列两点选取原则：

1）当空间大小允许时，应尽量使穿丝孔径大一些；

2）应使切割的起点位于两几何元素的交点。

由于冲压件的形状和大小种类繁多，千差万别，给穿丝孔位置、孔径和起割点的合理选取带来了困难，采用图形的等距缩放，可有效地解决这一问题。

设穿插丝孔径系列为 $d_1>d_2>d_3>\cdots\cdots$，图形缩放量按 $w_1=Kd/2$ 选取，其中 K 为加工比例系数。开始应选取用较大的 d 值，然后根据图形的特点，确定 d 值是否需要减小。对于切割内形（如凹模、卸料板等），穿丝孔在图形内，这时将轮廓向内缩小 w_1，构成新的图形，如图 9.8-55 中点划线所示。根据上述两点原则寻找穿插丝孔位置，首先对交点逐个进行判别，对于那些因缩小后不存在的交切点（主要指小圆弧缩小后 $c'<0$ 的情形），不加判别。若判别点两边的几何元素在靠近判别点处构成的图形不为虚形（如图 9.8-55 中的点 c'），则判别点为所求点。起割点就是原图形上与之对应的元素节点。否则（图 9.8-55 中的点 a'，b'）就转入下一点进行判别。若所有的交切点均不能作为穿丝孔位置，则说明所选取的穿丝孔孔径太大，应选较小的孔径，再按上法进行判别，直到找出合适的孔径与位置时为止。

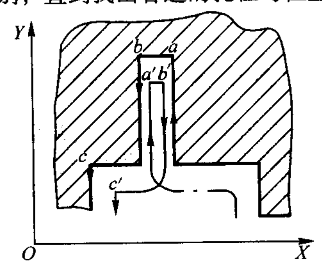


图 9.8-55　加工内形

若加工外形（如凸凹模与凸模），穿丝孔应在图形之外，则应以 w_1 为放大量对图形进行放大计算（图 9.8-56），和加工内形一样求出交切点，进行与前述一样的工作。所不同的是不必进行重复的放大计算工作，只要沿轮廓向前判别，便可找到合适的孔径，如图 9.8-56 中 d'既为所求之点。

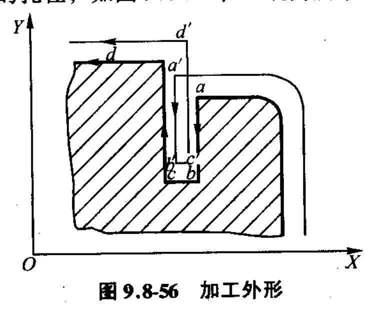


图 9.8-56　加工外形



8.3 自动编程过程

利用计算机实现自动编程的主要步骤如下。

1）输入图形信息。根据模具的刃口尺寸信息，计算出其几何信息，然后按照几何计算模型的要求，进行几何元素的顺序化、表征参数的标准化和向量化处理，转换成表 9.8-8 所列的数据表格。

2）选取穿插丝孔。选取合理的穿插丝孔位置和穿丝孔参数。

3）等距缩放。根据冲裁件板厚，确定合理的刃口间隙值，同时考虑不同的电蚀补偿和修模打光量以确定缩放量，对图形进行缩放计算，从而确定割丝中心运动的轨迹。

4）编程。完成等距缩放后，就可得到割丝加工时相对工件的运动轨迹，首先将穿丝孔中心与起割段元素的起点连接起来，作为切割的第一段元素，并按切割顺序将几何元素进行重新编排，按数控线切割机控制程序的格式要求进行编程和数码转换。

5）将几何元素进行反向编排变换。为了充分发挥自动编程的优越性，考虑到切割加工过程中有可能发生断丝，在程序设计时，可编入一几何元素反向编排变换程序。这样，可以得到一组与原切割方向相反，参数完全一样的数控程序。在切割过程中，当发生断丝时，只要换上新丝和相应的反向切割程序，就可以沿着与原切割顺序相反的方向将未割完部分继续切割完。图 9.8-57 所示为自动编程流程。

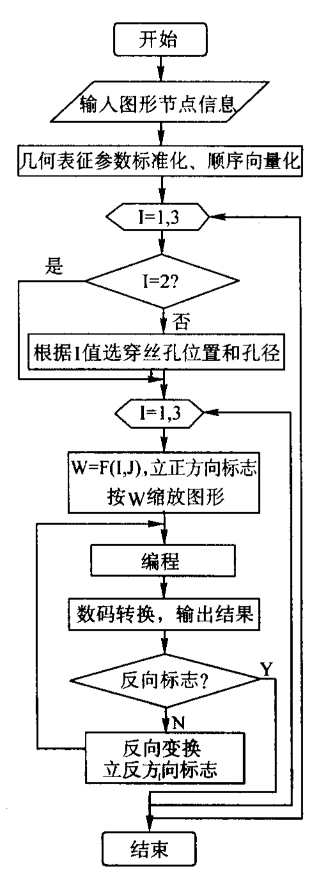


图 9.8-57　自动编程流程图

9 Mastercam 软件

CAD 和 CAM 在目前的产品设计及加工制造过程中，已经成为不可或缺的工具。使用 CAD/CAM 从事设计和数控加工程序编制，比较容易得到满意的结果，同时可节省时间，减少错误，降低成本，提高生产效率和产品质量。

Mastercam 是美国专业从事计算机数控程序设计专业化的公司 CNC Software Inc 研制出来的一套计算机辅助制造系统软件。它将 CAD 和 CAM 这两大功能综合在一起，是目前十分流行的一种软件。

9.1 系统特点概述

（1）Mastercam 的特点

1）Mastercam 除了可产生 NC 程序外，本身也具有 CAD 功能（2D、3D 图形设计、尺寸标注、动态旋转、图形阴影处理等功能），可直接设计图形并转换成 NC 加工程序，也可将用其他绘图软件（如 AutoCAD、CADkey、Mi－CAD、DRAWBASE及 VersaCAD 等）绘好的图形，经由一些标准的或特定的转换文件，如 DEF 文件（Drawing Exchange File）、CADL 文件（CADkey Advanced Design Language）及 IGES 文件（Initial Graphic Exchange Specification）等，转换到 Mastercam 中，再生成数控加工程序。此外，若要产生某一特定的曲线，可用 Basic、Fortran 或 C 语言等计算机程序设计语言编制相应的计算程序，生成符合要求的结果数据，再用 ASCII 将文件转换至 Mastercam 系统中。

2）Mastercam 是一套以图形驱动的软件，适应性相当广泛，操作方便，而且它能同时提供适合目前国际上通用的各种数控系统的后置处理程序文件，以便将刀具路径文件转换成相应的 CNC 控制器上所使用数控加工程序（NC 代码），如 FANUC、MELADS、AGIE、HITACHI 等数控系统。

3）Mastercam 能预先依据使用者定义的刀具、进给率、转速等，模拟刀具路径和计算加工时间，也可将 NC 加工程序（NC 代码）转换成刀具路径图。

4）Mastercam 系统设有刀具库及材料库，能根据被加工工件材料及刀具规格尺寸自动确定进给率、转速等加工参数。

5）提供 RS－232C 接口通信功能及 DNC（Direct Numerical Control）功能。

（2）系统文件转换

1）具有 3D ASCII（*X*、*Y*、*Z* 坐标点）文件直接接收能力，从而可与三坐标测量机相互通信。

2）3D CDL 文件与 CAD KEY 系统做直接沟通，而不需任何处理。

3）3D 的 IGES 文件可与提供 IGES 转换的软件做转换，如 AutoCAD、VersaCAD 等。

4）3D DXF 文件可与提供 DXF 转换的软件做转换。

5）NFL 文件目前可与 ANVIL CAD 系统的 3D 图形转换。

6）3D STL 文件可与快速成形软件转换。

7）3D VDA 文件转换。

8）SAT（实体模型）文件转换。

9）与 Mastercam 以前的版本转换图形。

（3）Mastercam 的 CAM 模块

可分为以下几种模块。

1）铣床 2D 模块（mill 2D），提供 2 轴加工。

2）铣床 2.5D 模块（mill 2.5D），提供 2～2.5 轴加工。

3）铣床 3D 模块（mill 3D），提供 2～5 轴加工。

4）车床模块（Lathe），提供 2 轴加工。

5）线切割模块（Wire EDM），提供 2～4 轴加工。

6）冲床模块（Punch），提供冲剪及展开功能。

7）火焰切割及激光加工模块（Plasma & Lasers）。

（4）Mastercam 的 Mill 软件

Mastercam 的 Mill 软件分为三个等级，即 Level 1，2 和 3。软件等级决定了用户可以使用的软件功能。有些软件功能只

有高等级的系统才能使用。如 Coons 曲面的刀具路径、三维扫描曲面刀具路径的生成以及多曲面组合的刀具路径等功能，只有 Level 3 才能使用。但系统的基本功能，如绘图、删除、缩放、编辑和打印等，所有的等级，即 Level 1，2 和 3 的软件都能使用。三个等级的功能分别如下。

1）Level 1。除上述基本功能外，还能生成下列刀具路径：①轮廓加工；②孔加工；③型腔加工；④文字加工。

2）Level 2。除了 level 1 的功能外，还包括生成下列刀具路径：①直纹曲面；②二维扫描曲面；③旋转曲面；④投影到平面、圆柱面、球面、圆锥面以及横截面上的刀具路径；⑤单一曲面（flowline）加工。

3）Level 3。允许使用 Mastercam 系统的全部功能，即在 Level 2基础上，另加以下功能：①放样曲面（Lofted surface）；②孔斯曲面（Coons surface）；③刀具路径修整(Trim)；④三维扫描曲面（3D Swept surface）；⑤投影到曲面上的刀具路径；⑥多重曲面（Multisurface）平行加工；⑦多重曲面（Mul-ti-surface）粗加工；⑧多重曲面（Multisurface）的参数线加工。

（5）系统输出

1）C 语言：C－Hooks 程序是 CNC Software Inc 用 C＋＋和 Mastercam C－Hooks 函数库所写的专业应用程序。

2）连线功能：绘图机、打印机。

3）刀具路径显示。

9.2　系统的运行环境和流程

Mastercam 系统 5.0 版（不含 5.0 版）以前的版本，属于 DOS 版本；5.0 以后的版本，均在 Windows 系统的环境下使用。

Mastercam 对 PC 机的硬件配置要求：

1）一般的 PC 机；

2）VGA 卡及彩色显示器；

3）鼠标；

4）绘图机或打印机；

5）软盘驱动器和 RS－232C 通信接口；

6）CD－ROM 用于安装系统。

图 9.8-58 所示为 MarstarCAM 的运行流程。

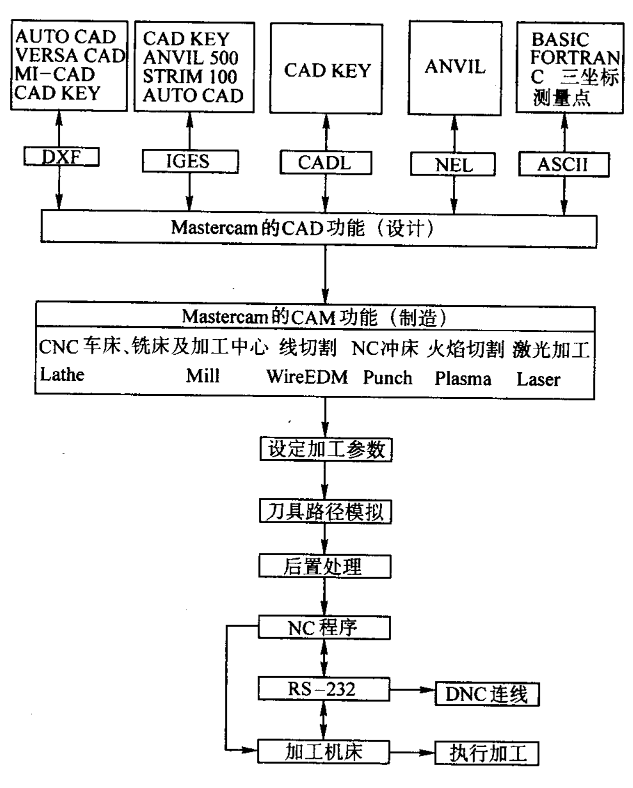


图 9.8-58　Mastercam 系统流程图

9.3　系统界面及功能

（1）系统界面

Mastercam 系统的主界面如图 9.8-59 所示。

主界面分为四个功能区：主功能表区、第二功能表区、绘图（图形显示）区、信息输入/输出区。

要退出 Mastercam 系统，从主功能表中选 Exit 后，再选择 Yes 即可。

（2）主功能表简要说明

1）Analyze（分析）：显示屏幕上的点、线、面及尺寸标注等资料。

2）Create（绘图）：绘制点、线、弧、样条曲线、矩形、曲面等。

3）File（文件）：存取、浏览几何图形、屏幕显示、打印、传输、转换、删除文件等。

4）Modify（修改）：可用 Fillet（倒圆角）、Trim（修整）、Break（打断）和 Join（连接）等功能去修改屏幕上的几何图形。

5）Delete（删除）：用于删除屏幕或系统图形文件中的图形元素。

6）Screen（屏幕显示）：用来设置 Mastercam 系统及其显示的状态。

7）Toolpaths（刀具路径）：用轮廓、型腔和孔等指令产生 NC 刀具路径。

8）NC utils（公用管理）：修改和处理刀具路径。

9）Exit（退出系统）：退出 Mastercam 系统，回到Windows。



10）Backup（返回）：回到前一页目录。

11）Main Menu（主功能表）：返回主功能表（最上层目录）。

（3）第二功能表简要说明

1）– PM –（尺寸标注参数）：用来设定标注尺寸的参数。

2）Z（工作深度）：用来设定绘图平面的工作深度。当绘图平面设定为 3D 时，设定的工作深度被忽略不计。

3）Color（颜色）：设定系统目前所使用的绘图颜色。

4）Level（图层）：设定系统目前所使用的图层。

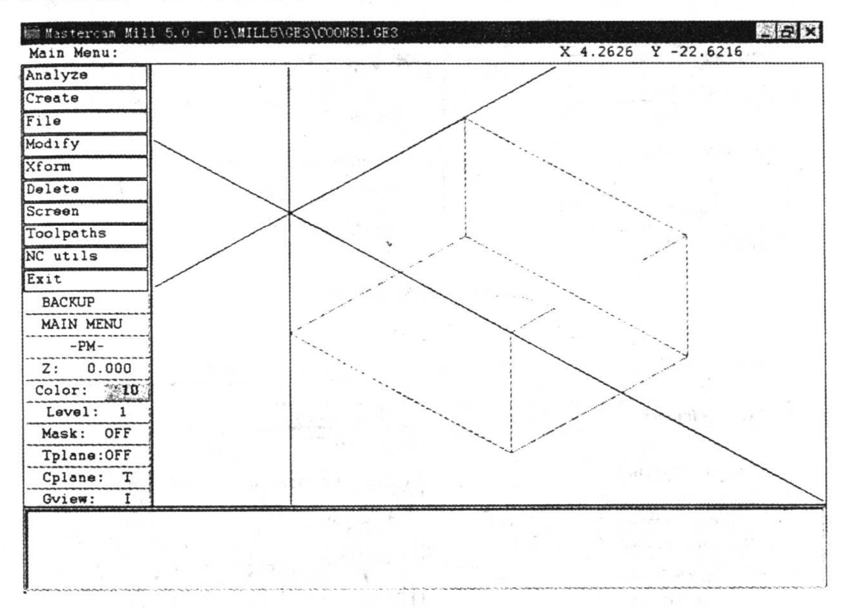


图 9.8-59 Mastercam 系统界面

5）Mask（使用层）：指定使用的图层，关掉非指定的图层的使用权。当设定为 OFF 时，全部的图层均可使用。

6）Cplane（绘图平面）：用来定义目前所要使用的绘图平面。

7）Gview（图形视角）：定义目前显示于屏幕上的视图角度。

8）Tplane（刀具平面）：设定一个刀具面。

9.4 用 Mastercam 编制 NC 加工程序的示例

用 Mastercam 生成 NC 加工程序的主要步骤包括：CAD（产生工件几何图形）；CAM（根据刀具及切削工艺参数，产生刀具路径及其他指令，如进给量、主轴、冷却等指令，输出 NCI 文件），然后应用 Post processor（后置处理器），将 NCI 文件转换为 CNC 能识别的 NC 代码，生成适合数控机床加工的数控加工程序）。

这里，用一个实例来说明用 Mastercam 生成 NC 加工程序的过程。

任务：产生用 ϕ12 的平底立铣刀加工如图 9.8-60 所示外轮廓的 NC 加工程序。

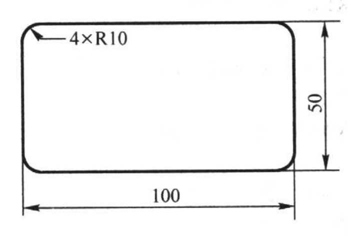


图 9.8-60 零件外形

步骤。

1）进入 Mastercam。

2）产生一个矩形。选择 Main Menu（主功能表）ΠCreate（绘图）ΠRectangle（矩形）Π1 Point（一点）ΠValues（坐标值）。

输入左下角：0，0（Enter）

输入宽度：100

输入高度：50

3）将矩形四角倒圆（R10）（图 9.8-61）。选 Main Menu（主功能表）ΠModify（修整）ΠFillet（倒圆角）ΠRadius（半径）。

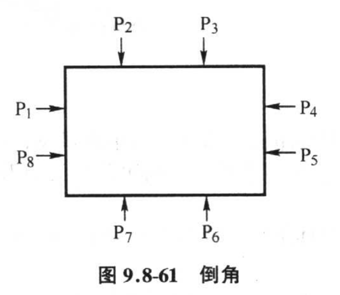


图 9.8-61 倒角

输入半径：10

选择 P_1，P_2，形成第一个倒圆角。

依次选择 P_3 ~ P_8 点，形成其余三个倒圆角。

4）用轮廓加工模块产生刀具路径。选择 Main Menu（主功能表）ΠToolpaths（刀具路径）ΠContour（轮廓加工）。

输入文件名

从 Contour 中 ΠChain

选择 P_8 点所在的位置，菱形指针沿顺时针方向前进。

选择 CloseΠEnd hereΠDone 完成轮廓连接。

5）设定轮廓参数。从图 9.8-62 所示功能表中选择设定参数。

6）设定刀具参数。在参数表中选 NC，进入刀具参数设定。

按图 9.8-63 所示设定，完毕后选择 Done，确认设定值，刀具路径即会出现在屏幕上。

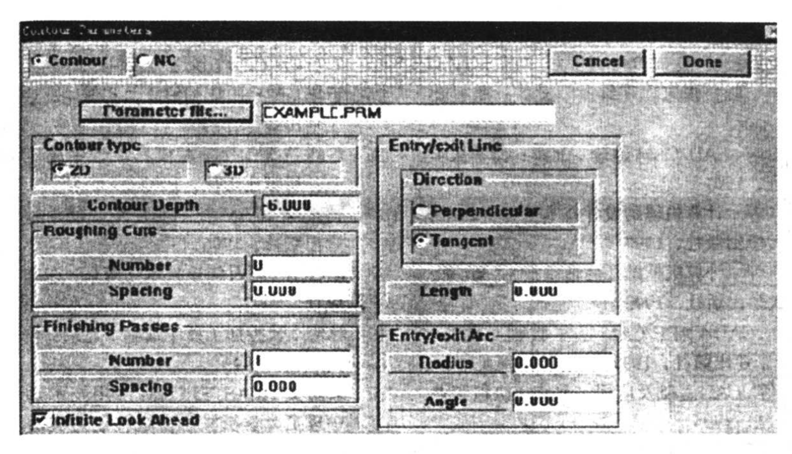


图 9.8-62 轮廓参数设定

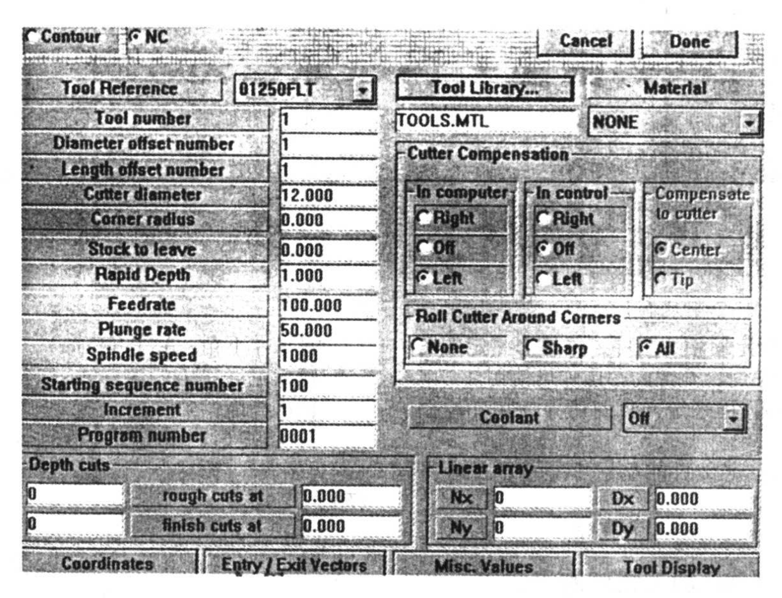


图 9.8-63 刀具参数设定

7）显示刀具路径。从功能表中选择 Write。

选择 Yes 接受刀具路径。则轮廓加工的刀具路径显示在屏幕上。

8）关闭刀具路径。选择 End Program，关闭刀具路径文件。

显示“Run Post Processor?”选择 No。

9）选择 Main Menu（主功能表）ΠNCutils ΠBackplot ΠRun，屏幕上模拟显示刀具加工路径。

10）选择 Main Menu（主功能表）ΠNCutils ΠPostproc ΠChange。

输入所需后置处理器名（C：\ mill5 \ ＊.pst）：mpfan

11）生成 NC 加工程序。选择 Run。

输入需转换的刀具路径的文件名

输入 NC 文件名

所生成的 NC 加工程序显示于屏幕上。

```
(PROGRAM NAME - EXAMPLE)
(DATE, Day - Month - Year - 02 - 12 - 1998 TIME, Hr:Min - 11:40)
(TOOL - 01 DIA.OFF. - 01 LENGTH - 01 DIA. - 12.0000 2D - CONTOUR)
%
O0001
N100 G00 G40 G49 G80 G90
/N101 G91 G28 Z0.
/N102 G28 X0.Y0.
/N103 G92 X0.Y0.Z0.
N104 G00 G90 X-6.Y10.S1000 M3
N105 G43 H1 Z1.
N106 G1 Z-6.F50.
N107 Y40.F100.
N108 G2 X10.Y56.116.J0.
N109 G1 X90.
N110 G2 X106.Y40.I0.J-16.
N111 G1 Y10.
N112 G2 X90.Y-6.I-16.J0.
N113 G1 X10.
N114 G2 X-6.Y10.I0.J16.
N115 G0 Z1.
N116 M05
N117 G91 G28 Z0.
N118 G90
N119 M30
%
```

9.5 注塑模具 CAM 示例

本节以 MasterCAM 软件为例来说明一模具零件的加工。

图 9.8-64 为一要加工的模具型腔，该零件已在 CAD 中设计出来并存储，当要产生加工程序时，可直接将其调出。

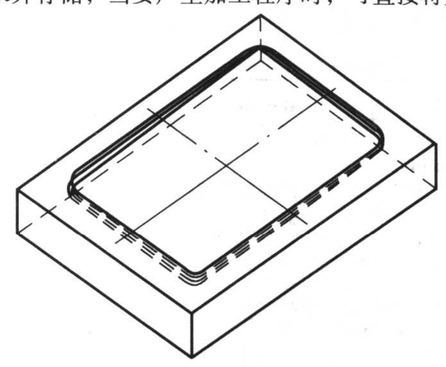


图 9.8-64 要加工的模具型腔

首先进行刀具轨迹的生成。一般的模具 CAM 软件在处理刀具轨迹时分为 2 轴加工、3 轴加工、4 轴加工及 5 轴加工等几种，以不同的加工方式形成刀具轨迹。图 9.8-64 的模板涉及到的有 2 轴加工和 3 轴加工。

9.5.1 2 轴加工

一般的 2 轴加工有三种方式：一种是轮廓加工，即在 2 轴内加工由直线、圆弧、折线、样条等组成的轮廓线；另一种是进行钻、扩、铰、攻螺纹等的定位加工；还有一种是挖槽加工。

所要加工的模板外形可以通过轮廓加工得到。轮廓加工的过程是首先从软件菜单中选刀具路径一项，再选轮廓加工。这时计算机会提示输入轮廓形状，用鼠标选取矩形轮廓。然后，计算机会弹出工艺参数表，如图 9.8-65 所示，其中包括走刀形式和刀具参数。当执行完成后计算机就产生加工轨迹。此加工轨迹也可根据操作员的需要进行修改。当确认刀具轨迹合适后，就会产生一个刀位文件，存储起来，以供后置处理产生 NC 代码。

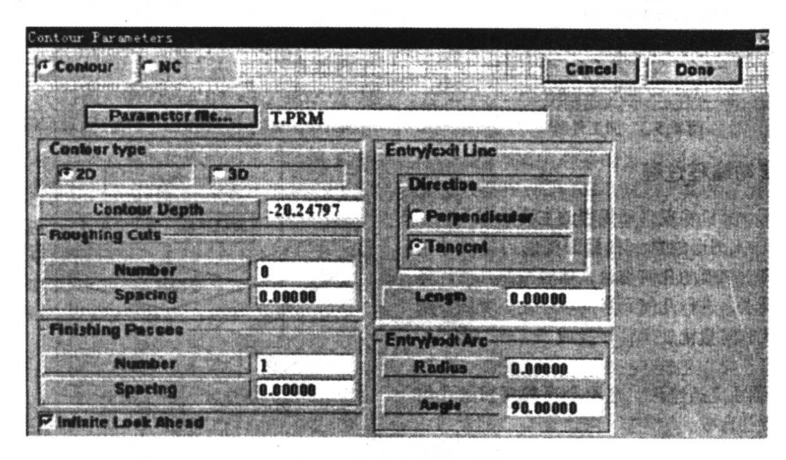


图 9.8-65 工艺参数表

9.5.2 3 轴加工

在 3 轴加工中通常有单一曲面和多重曲面加工。单一曲面仅用于产生一个曲面的刀具路径。多重曲面指令可以一次同时产生多个曲面的刀具路径。型腔可以用单一曲面一个一个地加工，也可用多重曲面一次性加工。在此采用多重曲面来加工。

首先调出模板零件，如图 9.8-66 所示。

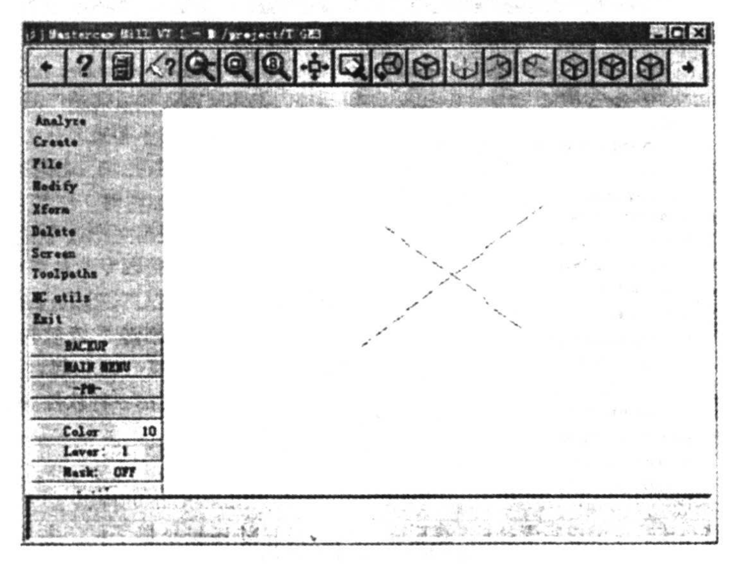


图 9.8-66 调出加工工件

然后选取菜单中刀具路径一项，其中的功能有外形铣削、钻孔、挖槽、单一曲面、多重曲面及5轴加工等，这里选取多重曲面功能。该功能下又分精、粗加工。

选取全部曲面，即型腔，并填写工艺参数表。

刀具的其他参数如图 9.8-67 所示，包括刀具名称、刀具材料、刀具的直径、*XY* 轴及 *Z* 轴的吃刀量、进给率等。用户可以根据实际情况确定这些参数。

当以上的操作完成之后，计算机就可以生成实际的刀具轨迹，如图 9.8-68 所示。如果对刀具轨迹不满意还可以进行修改。

当刀具轨迹生成后，经过后置处理，最后输出的 NC（数控）程序，如图 9.8-69 所示。

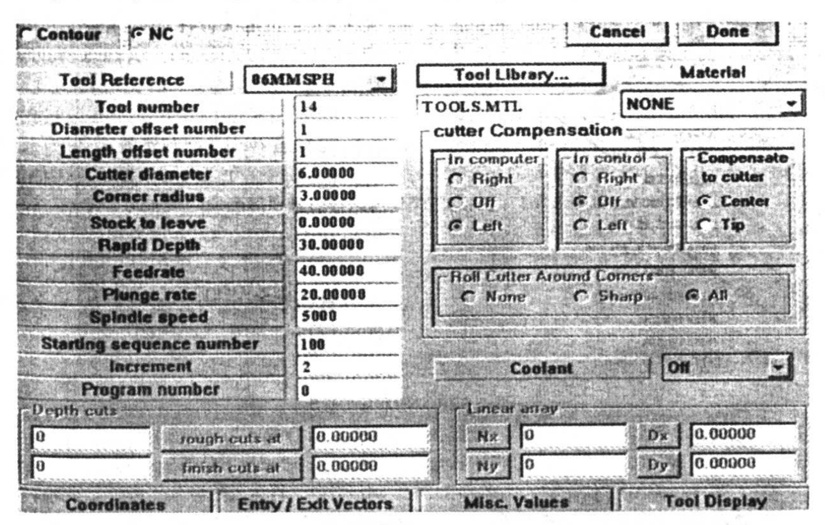


图 9.8-67　刀具参数表

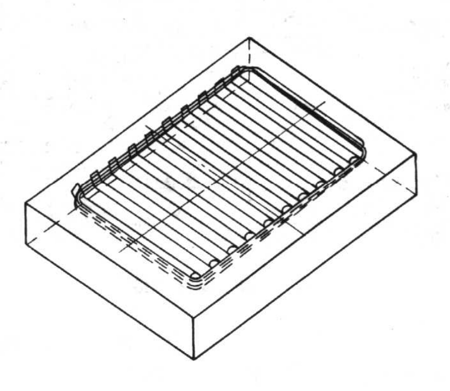


图 9.8-68　刀具轨迹

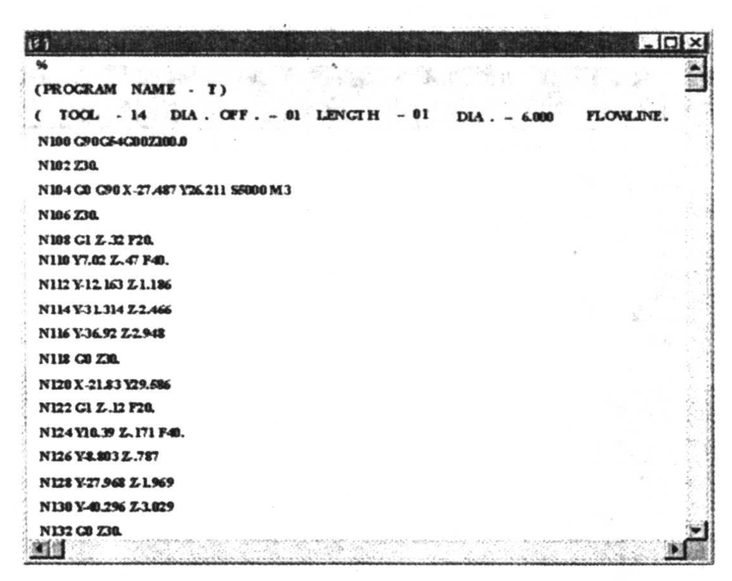


图 9.8-69　NC 程序的输出

编写：李志刚（华中科技大学）



第 9 章　冲压模具 CAD

1　冲裁模系统的结构与功能

计算机辅助设计在冲裁模具中的应用较早，这是因为冲裁零件为平面零件、图形输入和处理比较容易实现的缘故。目前，冲裁模 CAD/CAM 系统已经比较成熟，应用亦较普遍。

1.1　冲裁模 CAD/CAM 系统的结构

通常，冲裁模 CAD/CAM 系统可用于简单模、复合模和连续模的设计制造。将产品零件图输入计算机后，系统可完成工艺分析计算和模具结构设计，绘制模具零件图和装配图，完成数据 NC 编程。

为完成上述功能，冲裁模 CAD/CAM 系统由硬件和软件两部分组成。系统的硬件组成除主机（微机）外，还包括硬盘、图形显示器、绘图仪、鼠标器等，其硬件组成见图 9.9-1。

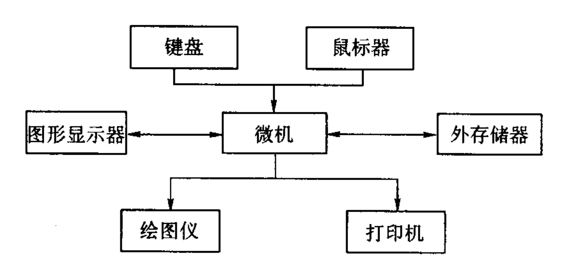


图 9.9-1　冲裁模 CAD/CAM 系统硬件组成

系统的软件由应用软件、数据、图形支持软件组成，见图 9.9-2。其中，数据库采用关系型数据库，库中存放工艺设计参数、模具结构设计参数、标准数据以及公差、材料性能等数据。采用数据库系统管理这些数据，便于数据的检索，减少数据的冗余，可保证数据的一致性。

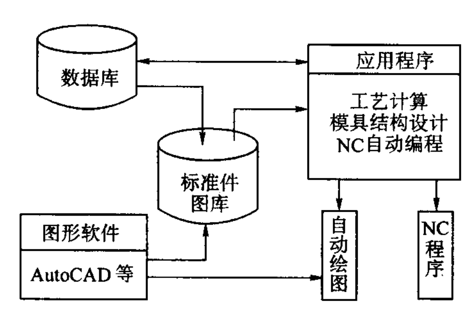


图 9.9-2　冲裁模 CAD/CAM 系统软件组成

图形支撑软件可选用 AutoCAD 等图形系统，即在 AutoCAD 等系统基础上进一步开发产品零件图输入、模具结构设计和模具标准零件图形库。应用程序包括产品图输入、工艺性判断、毛坯排样、工艺方案选择、冲压力与压力中心计算、单冲模的工序设计以及级进模条料排样、模具结构设计与绘图、NC 自动编程等模块。其中，图形输入是应用交互式输入方式，操作直观、方便，构图迅速，且具有检错功能。工艺性判断模块采用自动判断方法评价冲裁件的冲压工艺性能。毛坯排样模块分为自动优化排样与交互排样两种方式，后者多用于级进模设计。工艺方案选择以及工序设计、模具结构设计均采用自动与交互相结合的方法，整个系统的运行高效灵活，操作方便，实用性强。

1.2　系统的功能与流程

冲裁模 CAD/CAM 系统的运行流程如图 9.9-3 所示。

首先，将冲裁零件的形状和尺寸输入计算机，图形处理程序将其转换为机内模型，为后续模块提供必要的信息。

常用的冲裁件图形输入方法有编码法、面素拼合法和交互输入法等。

冲裁零件图形的定义可归结为对点、线、圆及其相互位置关系的描述。用编码法输入冲裁件图形时，将组成零件轮廓的几何元素的类型、尺寸和相互位置关系以代码表示，按照几何元素之间的相互决定关系，依次对轮廓元素进行描述。编码法的优点在于节省机时，可预先对零件图编码形成输入数据，其缺点是编码规则较多，出错率较高。

面素拼合法类似于三维几何造型中的体素拼合，利用一些称为面素的简单几何图形的并、交、差，拼合成冲裁件图形。面素拼合法具有较高的图形输入效率，但其缺点是缺少尺寸公差信息，会给其他应用带来一些困难。

交互输入方法通过在屏幕上交互作图，完成冲裁件的图形输入。这种方法可对图形进行交互编辑、修改、插入和删除，具有输入直观、显示及时等优点。目前，大多数冲模 CAD/CAM 系统都采用这种图形输入方法。

冲裁件为二维形状，是三维冲压件的特殊情况，所以利用第 5 章中介绍的冲压件几何造型系统也可以完成冲裁件的图形输入。

工艺性判断模块以自动搜索和判断的方式分析冲裁件的工艺性。如零件不适合冲裁，则给出提示信息，要求修改零件图。

毛坯排样模块以材料利用率为目标函数进行排样的优化设计。程序可完成单排、双排和调头双排等不同方式的排样，从众多的排样方案中选出材料利用率最高的方案。

工艺方案的选择，即决定采用简单模、复合模或连续模，通过交互方式实现。程序可以按照内部结合的设计准则自动确定工艺方案，用户也可以自行选择认为合适的工艺方案。这样，系统便可适应各种不同的情况。

如图 9.9-3 所示，简单模和连续模为一个分支，复合模的设计为另一分支。在各分支内，程序完成从工艺力计算到模具结构与零件设计的一系列工作。凹模和凸模形状的设计可通过屏幕上显示的图形菜单选择确定。凹模内顶杆的优化布置，使顶杆分布合理，顶杆合力中心与压力中心尽量接近。在设计挡料装置时，用户可以用光标键移动屏幕上的圆销，以选定合适的位置。

模具设计完毕后，绘图程序可根据设计结果自动绘出模具零件图和装配图。系统的绘图软件包括绘图基本软件、零件图库和装配图绘制程序等。

绘图基本软件包括几何计算子程序、数图转换子程序、尺寸标注程序、剖面线程序、图形符号包和汉字包。

零件图库由凸模、凹模、上下模座等零件的绘图程序组成。绘制凹模、凸模、固定板和卸料板等零件图的关键是将冲裁件的几何形状信息通过数图转换，生成冲裁件的图形。此外，还要恰当地处理剖面线和尺寸标注。所有这些均可调用基本软件中的有关程序完成。

装配图的绘制采用图形模块拼合法实现，即将产生的零件图的视图转换成图形文件，将各装配件的图形插入到适当的位置，拼合成模具装配图。



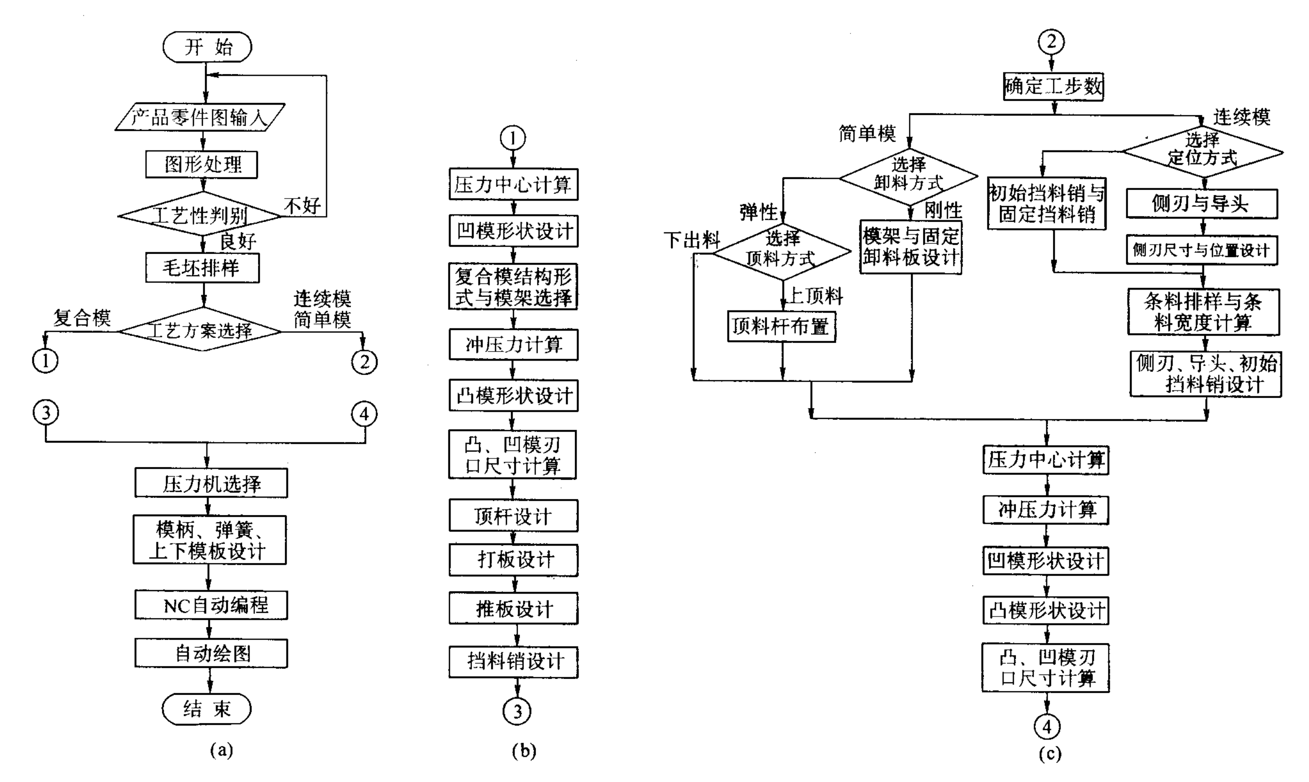


图 9.9-3 冲裁模 CAD/CAM 系统的流程

该系统利用 AutoCAD 绘图软件包作为绘图的基础软件，将此软件包和高级语言结合使用，完成绘图程序的设计。

数控线切割自动编程模块可选择穿丝孔位置和直径，确定起割点，计算金属丝的运动轨迹，按照数控线切割机床控制程序的格式完成 NC 编程。

2 冲裁件工艺性判断

在设计模具前，首先要判断冲裁件的工艺性是否良好。冲裁件的工艺性是指零件对冲裁工艺的适应性，包括冲裁件的形状、尺寸及偏差、孔间距等内容。工艺性良好与否，对冲裁件的质量和模具寿命有很大影响。人工设计时，工艺可行性的分析由有经验的设计人员完成，在计算机辅助设计中，这一工作则借助计算机来实现。

计算机辅助分析工艺可行性的方法大体可分为两类，一类是自动判别，另一类是交互判别。在工艺性的自动判别方法中，根据不同的判定类型建立各种算法。利用冲裁件的几何模型和工艺参数文件中的标准极限数据，对各种判定类型逐一分析判断。交互判别方法则是利用图形显示、旋转、放大和平移等功能，采用较直观的方法实现工艺性判别。

在工艺性的自动判别中，首先要对图形进行搜索，找出判别对象，并确定其类型。然后，求出判别对象的几何特征量，与允许的极限值进行比较。下面介绍自动判别程序的原理和方法。

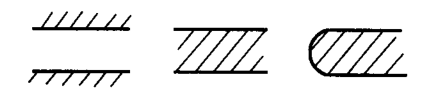
2.1 判别模型的建立

冲裁工艺性的判别就是将冲裁件图形中的圆角半径、孔径、孔边距、孔间距、槽宽和悬臂等几何特征量与相应的工艺极限值进行比较，以决定零件是否适合于冲裁。为此，程序必须能辨识判别的类型。

冲裁件图形中元素的组合可用线-线和圆-圆关系描述。因为直线可视为半径无限大的圆，所以直线与圆的组合可用圆-圆关系表示。利用这些关系便可识别冲裁件图形中的不同几何特征。

(1) 线-线关系

直线和直线间的关系可分为虚型和实型两类，虚型关系的两直线间为图形以外的部分（图 9.9-4a），实型关系的两直线间为零件的实体。实型又分为开放型与封闭型两种（图 9.9-4b，c），当两直线属于同一轮廓时为封闭型。



(a) 虚型　　(b) 开放型　　(c) 封闭型

图 9.9-4 直线与直线间的关系

在冲裁件图形中，当两直线间为虚型关系时，其工艺判别类型为窄槽。当两直线间存在开放实型关系时，工艺性判别类型为槽边距或槽间距，与封闭实型关系相对应的工艺性判别类型为细颈和悬臂。

使用线-线关系的条件是两直线段间有相互包容的共同部分。共同部分的检测可通过比较直线段端点位置实现。另外，两直线间的夹角超过规定值时，则不属于判别的对象，可不考虑。

(2) 圆-圆关系

圆弧与圆弧之间的关系可分为同向与异向两大类（图 9.9-5）。在建立的模型中，规定逆时针走向的圆弧为正，顺时针走向的圆弧为负。根据两圆弧走向的异同，可判别两圆弧间的关系为同向或异向。同向圆弧又可分为 O 型和 X 型两种情况。每种情况根据其相对位置可分为实型和虚型，而实型也有开放与封闭之分。

当两圆弧之间存在异向关系，如一圆的圆心在另一圆内，则工艺性判别类型为环宽。当两圆弧之间的关系为同向



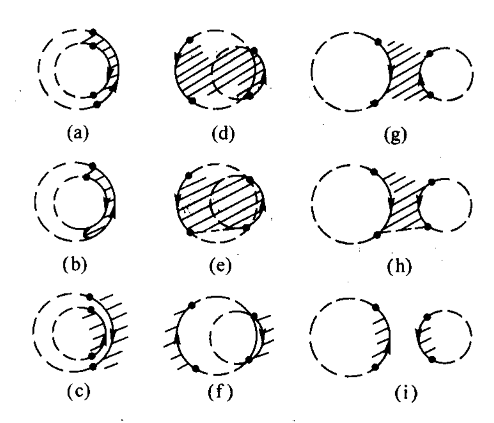


图 9.9-5 圆弧与圆弧间的关系

X 型时，工艺性判别类型为孔间距。对于一圆心在另一圆之外的小 O 形关系，按细颈或窄槽判别。

对于圆弧本身，仅需根据其所属轮廓和半径大小来判别孔径和圆角半径等特征量。

2.2 处理图形的几种算法

在图形的自动识别与处理中，常用到下述的一些算法，这些算法可使程序的效率大大提高。

(1) 圆弧走向判别

在图 9.9-6 中，a、b 分别为圆弧的起点和终点，O 为圆心。判别式 S 为

$$S=\begin{vmatrix} x_o & y_o \\ x_a & y_a \end{vmatrix}+\begin{vmatrix} x_a & y_a \\ x_b & y_b \end{vmatrix}+\begin{vmatrix} x_b & y_b \\ x_o & y_o \end{vmatrix}$$

当 $S>0$ 时为逆向圆弧（图 9.9-6a），$S<0$ 时为顺向圆弧（图 9.9-6b）。

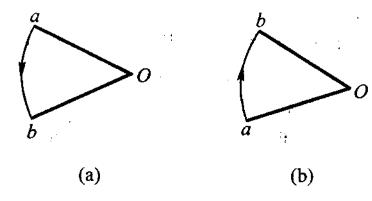


图 9.9-6 圆弧走向的判别

这种判别方法方便了自动化设计程序的编制，并可应用于多种平面图形处理问题。

(2) 重叠测试

如果两个多边形在 x 和 y 方向都不重叠，那么它们就不可能互相遮蔽。最小最大测试就是基于这种思想的一种排除重叠的快速方法（图 9.9-7a）。这种方法是把一多边形的最小 x 坐标与另一多边形的最大 x 坐标相比较。这种比较对于 y 坐标也适用。

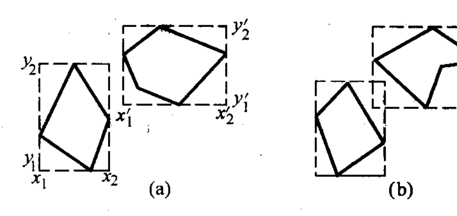


图 9.9-7 最小最大测试

这种二维的 $x-y$ 最小最大测试通常称为边界方框测试，是一种常用的平面图形处理方法。图 9.9-8 为这种算法的框图。

当最小最大测试不能指出两个多边形是否互相分离时，它们仍有可能不相重叠（图 9.9-7b）。在这种情况下必须采用较复杂的测试，以确定两多边形是否相交。当对两多边形的边线逐一比较时，用一维的最小最大测试也有助于加速处理过程。

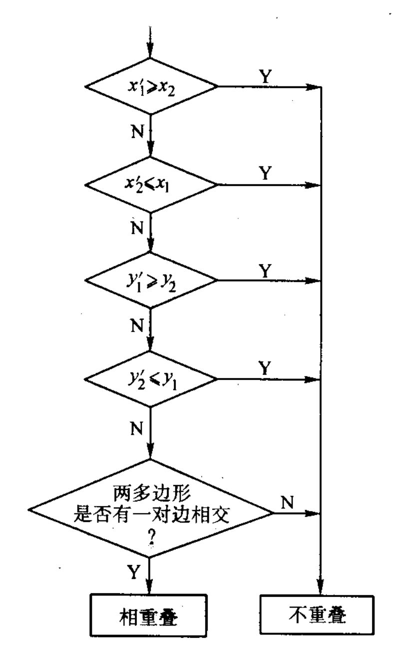


图 9.9-8 边界方框测试的算法框图

(3) 包容测试

从多边形的轮廓描述可以判定给定点是否位于多边形之内。这只要从该点出发作一条假想的射线，计算该线与多边形边线的交点个数就行了，如交点个数为奇数，则该点位于多边形内（图 9.9-9）；若为偶数，则被判点在多边形边界之外。

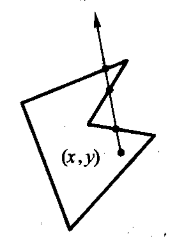


图 9.9-9 包容测试方法

采用点的包容测试方法，经多次处理即可测试两多边形之间的包容关系。

2.3 工艺性的自动判别过程

根据前述的模型可以实现元素的选择与工艺性类型的判别。工艺性自动判别的过程可用图 9.9-10 表示。

首先程序由数据库中读人材料和图形的有关数据，然后选择判别对象。为了确定判别对象元素，需对冲裁零件图进行搜索。对于轮廓上的直线元素和圆弧元素，根据它们与其他元素的夹角和距离，逐一判断是否为对象元素。

找到对象元素后，利用建立的判别模型可以确定判别的工艺性类型。然后，计算几何特征量的值，并将其与标准工艺参数文件中的极限值比较，以确定工艺性是否良好。程序将自动判别的结果显示出来，用户可根据情况决定设计过程是否继续下去。



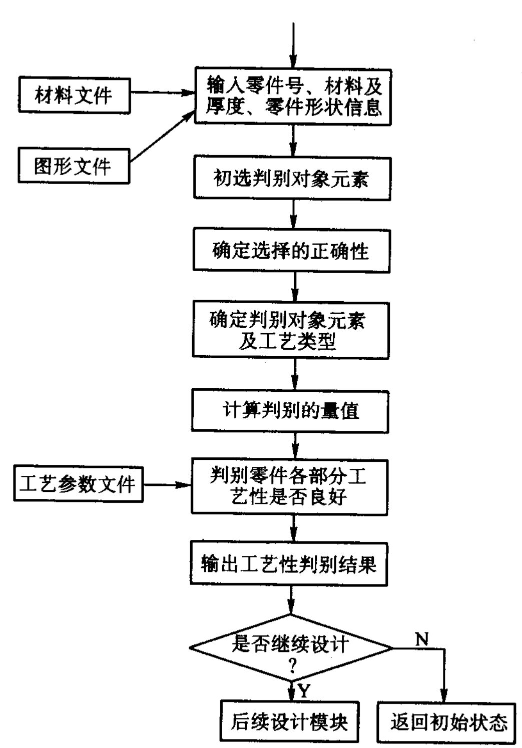


图 9.9-10 工艺性的自动判别过程

3 毛坯优化排样

在冲裁零件的成本中材料费用占 60% 以上。在大量生产中，即使将材料利用率提高 1%，其经济效益也相当可观。因此，材料的利用是冲压生产中的一个重要问题。

毛坯排样的目的在于寻求材料利用率最高的毛坯排列方案。人工排样一般难以获得最佳排样方案，这是因为制件的布置方案多种多样，要比较这些方案的材料利用率高低是手工计算所不能胜任的。另外，制件形状千差万别，单凭经验和直觉作出正确判断往往是困难的。计算机排样较之手工排样具有明显的优越性，可显著提高材料利用率。使用情况表明，计算机优化毛坯排样可使材料利用率提高 3%～7%。

在冲裁模设计中，凹模、卸料板和凸模固定板等零件的设计均需利用排样结果所提供的信息，因此在系统流程图中毛坯排样处于较前的位置。

3.1 毛坯排样问题的数学描述

在实际生产中常用的排样方式有四种：普通单排、普通双排、对头单排和对头双排，见图 9.9-11。

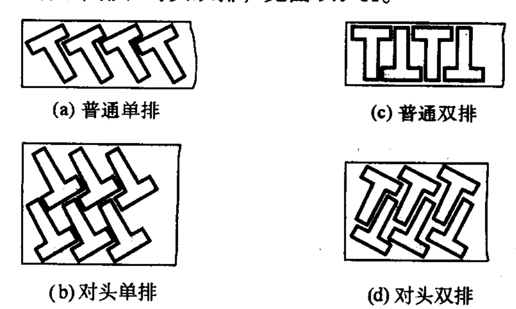


图 9.9-11 常用的排样方式

对于卷料（或带料）冲裁，可以用材料的步进利用率来评价排样方案的优劣，其材料利用率

$$\eta = \frac{A}{HS} \times 100\%$$

式中，A 为一个步距上所排列的零件的面积；H 为卷（带）料的宽度；S 为进给步距。

对于板料冲裁，其材料利用率

$$\eta = \frac{NA_1}{LB} \times 100\%$$

式中，N 为由板料冲得的零件数目；A_1 为一个零件的面积；L 为板料长度；B 为板料宽度。

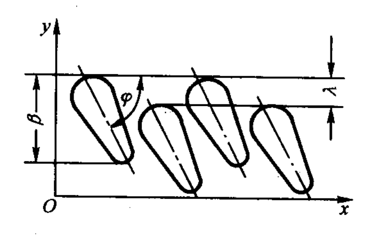


图 9.9-12 决定排样的参数

一般来说，排样可由图 9.9-12 所示两个参数 ϕ 和 λ 决定。参数 ϕ 和 λ 的变化范围为

$$G\{0 \leqslant \phi \leqslant \pi, -\beta(\phi) \leqslant \lambda \leqslant \beta(\phi)\}$$

式中，$\beta(\phi)$ 为 ϕ 的单值函数，它反映了图形在 y 轴方向上宽度与 ϕ 角的关系。

所以排样的优化问题在于寻找 ϕ 和 λ 的最佳值，使目标函数

$$\eta(\phi,\lambda) = \frac{A}{H(\phi,\lambda)S(\phi,\lambda)} \text{（对于卷料）}$$

或

$$\eta(\phi,\lambda) = \frac{N(\phi,\lambda)A}{LB} \text{（对于板料）}$$

在域 G 内达到最大值。

由于产品零件的复杂性，难以用一个统一的解析式表达排样问题的目标函数。所以，计算机辅助排样的方法虽有多种，但基本思想却是相同的，即从排列零件的所有可能的方案中选出最优者，也就是采用优化设计中的网格法解决毛坯排样问题。

计算机排样方法可分为半自动化和自动化两大类。属于前者的方法需要较多的人机交互作用，利用图形交互设备和图形软件提供的操作图形的功能在屏幕上完成图形布置，利用计算机比较材料利用率的大小，从中选择理想的方案。

自动化排样方法则由程序自动完成排样方案的产生、材料利用率的比较和最优方案的选择。常用的程序排样方法有多种，这里主要介绍多边形法、高度函数法和平行线分割纵横平移法。

3.2 多边形法

这种方法的特点是将平面图形以多边形近似，通过旋转、平移得到不同方案，从中选择最佳者。其主要步骤如下。

（1）多边形化

以直线段代替圆弧段，用多边形代替原来的零件图形，图 9.9-13 为多边形化的示意图。

（2）等距放大

排样零件之间的最小距离为搭边，在计算机排样时处理的为包括了搭边值的等距放大图，即将多边形化的图形向外等距放大 $\Delta/2$。当两等距图相切时，自然保证了搭边值 Δ。

（3）图形的旋转、平移

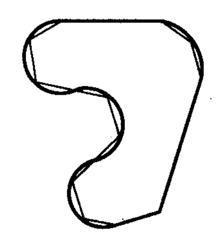


图 9.9-13　零件图形的多边形化

通过旋转、平移使等距图相切，这样就产生了一种排样方案。

(4) 与已存储方案比较，保留材料利用率高的方案。如全部搜索完毕，转至 (5)，否则转到 (3)。

(5) 输出排样结果

图 9.9-14 为采用多边形法实现旋转 180°单排排样的流程图。这种排样方法的优点是概念清晰，适用于各种情况，缺点是运行时间较长。应该指出的是，该方法对于凸多边形是完全正确的，对凹多边形而言，有可能丢失全局最优解。

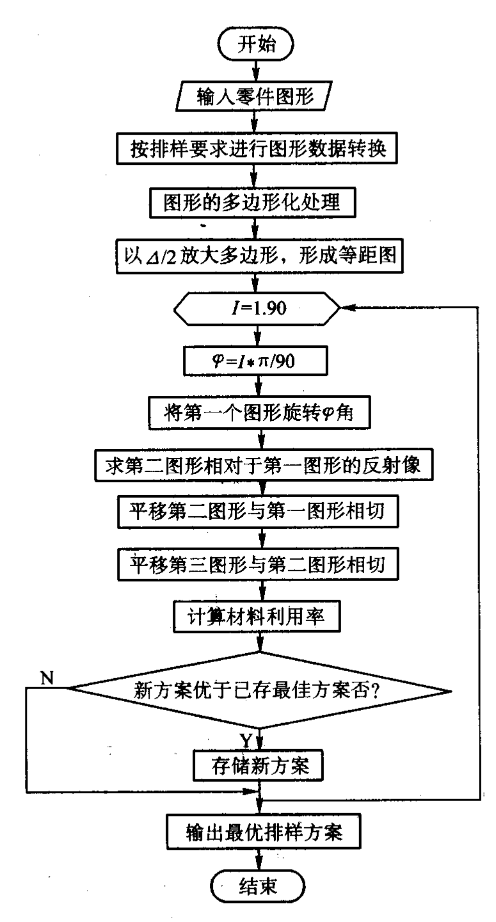


图 9.9-14　多边形法的流程框图

3.3　高度函数法

分析毛坯排样中冲裁件图形的位置特点可知，在排样图上各图形的轴线总是相互平行的 (图 9.9-15)。如前所述，在一般的排样方法中以 ϕ 和 λ 为参数进行优化。高度函数法则是根据图形轴线的平行性，采用各图形的相对高度差 $h_{i,j}$ 为优化排样参数。在图 9.9-15 所示的双排排样中，以 h_{12} 和 h_{23} 为排样参数。

参数 ϕ 和 λ 与参数 h_{12} 和 h_{23} 之间存在以下关系：

$$\phi = \pi/2 - \arctan(h, r) \tag{9.9-1}$$

$$\lambda = h_{12}\sin\phi - r_{12}\cos\phi \tag{9.9-2}$$

如图 9.9-15 所示，在排样中各个图形均置于其自身坐标系中。第一、第二和第三图形的坐标系分别为 $x_1O_1y_1$，$x_2O_2y_2$ 和 $x_3O_3y_3$。r_{12} 和 h_{12} 为第二图形自身坐标系原点在第一图形自身坐标系中的坐标。r_{23} 和 h_{23} 为第三图形坐标系原点在第二图形坐标系中的坐标。式 (9.9-1) 中，h 为 h_{12} 与 h_{23} 的代数和，表示 O_3 点到 x_1 轴的距离；r 为 y_3 轴与 y_1 轴的间距，其值为

$$r = \max\{[r_{12}(h_{12}) + r_{23}(h_{23})], r_{13}(h)\} \tag{9.9-3}$$

(1) 可行域与相切条件

设图形在其自身坐标系中包括搭边值在内的高度为 t (图 9.9-16)，则搜索最优排样方案的可行域为

$$G\{-t \leqslant h_{12} \leqslant t, -t \leqslant h_{23} \leqslant t\}$$

因为各图形自身坐标的 y 轴在排样图中相互平行，各图形的高度皆为 t，所以 G 为方形域。

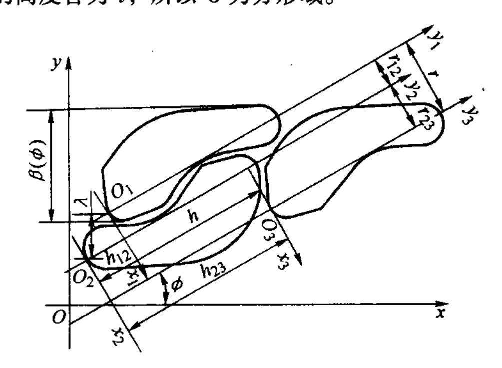


图 9.9-15　排样时图形间的关系

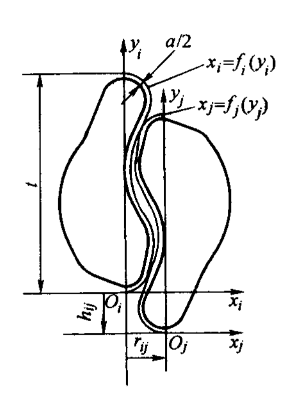


图 9.9-16　两图形相切时的关系

如果将可行域等分，网格数为 $2m \times 2m$，则搜索时 h_{12} 和 h_{23} 每次变化的量 $\Delta t = t/m$。程序分两次优化，第一次为初步优化，第二次为细分优化，即在第一次求得的最优值附近细分网格，进一步搜索。设第一次优化求得的最优值为 h_{12} 和 h_{23}，第二次优化时的搜索区域为

$$G'\{h_{12} - \Delta t \leqslant h'_{12} \leqslant h_{12} + \Delta t,$$
$$h_{23} - \Delta t \leqslant h'_{23} \leqslant h_{23} + \Delta t\}$$

通过两次搜索，求得的最优值已相当精确。

为了获得排样方案，通常将图形等距放大半个搭边值，在排列图形时使相邻的放大图形相切。确定两图形相切的算法对于优化排样的速度有重要影响。在图 9.9-16 中，两图形置于自身的坐标系 $x_iO_iy_i$ 和 $x_jO_jy_j$ 中。图形以其最高点和最低点为界分为两部分，设图形 i 的右半部分的曲线为 $x_i = f_i(y_i)$，图形 j 的左半部分曲线为 $x_j = f_j(y_j)$。当两图形相切时，存在如下关系：



$$r_{ij}=\begin{cases}\max\limits_{t\geq y_i\geq h_{ij}}\left[f_i(y_i)-f_j(y_i-h_{ij})\right] & t\geq h_{ij}\geq 0\\ \max\limits_{t+h_{ij}\geq y_i}\left[f_i(y_i)-f_j(y_i-h_{ij})\right] & -t\leq h_{ij}\leq 0\end{cases}\tag{9.9-4}$$

式中，r_{ij}为O_j在$x_iO_iy_i$坐标系中的横坐标。利用式（9.9-4）的关系，可以预先在h_{12}、h_{23}和h_{13}的等分点上算出r_{12}、r_{23}和r_{13}的值，并列成数据表。在排样过程中可直接调用这些数值，因而提高了效率。

这种确定两图形相切的方法与加密点排样法采用的算法类似，在确定图形相切时避免了计算量很大的迭代运算。但是，应该指出的是，这种方法对于凸图形是完全正确的，对于具有凹下部分的图形在绝大多数情况下也可找到最优值，但在个别情况下可能丢失最优解。正如绝大多数优化方法都有其一定的适用范围，这种方法也有其适用范围，但是其运行速度快，计算效率高，所以仍不失为一种好的排样方法。

（2）条料宽度、步距和材料利用率的计算

如图 9.9-17 所示，将图形放置在极坐标系中，极坐标系原点与其自身参考坐标系原点重合，x 轴方向与自身参考坐标系的x_i轴方向一致，图形的轮廓曲线为$\rho(\theta)$。设 l 轴与x轴之间的夹角为φ，则图形轮廓和 l 轴的最大距离为

$$T(\varphi)=\max_{0\leq\theta\leq 2\pi}\left[\rho(\theta)\sin(\theta-\varphi)\right]\tag{9.9-5}$$

这里，将$T(\varphi)$定义为高度函数。

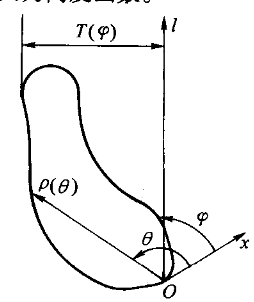


图 9.9-17 高度函数的定义

在图 9.9-15 中，ϕ 角可由式（9.9-1）确定，排样条料方向与图形自身坐标系 x_1 轴的夹角为

$$\varphi=\frac{\pi}{2}-\phi\tag{9.9-6}$$

因此，条料的宽度 B 可用下式计算：

$$B=\max\left[T_1\left(\frac{\pi}{2}-\phi\right),\ T_2\left(\frac{\pi}{2}-\phi\right)+\lambda\right]-\min\left[T_i\left(\frac{3}{2}\pi-\phi\right),\ T_2\left(\frac{2}{3}\pi-\phi\right)+\lambda\right]+a\tag{9.9-7}$$

式中，T_1、T_2分别为第一图形和第二图形的高度函数，a为搭边值。因为在制件的等距放大图中放大量为$a/2$（图9.9-16），所以式中应包括搭边值 a。如果考虑到制件间的搭边和侧搭边不同，可对此项进行修正。$T_i\left(\frac{3}{2}\pi-\phi\right)$表示图形$i$的下半部轮廓和参考轴$l_i$之间的最大距离。$\lambda$按式（9.9-2）计算，因为$\lambda$值表示制件 2 相对于制件 1 的错移量，所以其值有正负之分。

参考图 9.9-15，不难得出计算进给步距 H 的公式：

$$H=\sqrt{r^2+h^2}=\sqrt{\left[\max(r_{12}+r_{23},r_{13})\right]^2+(h_{12}+h_{23})^2}\tag{9.9-8}$$

所以，条料的步进材料利用率 η 可用下式计算：

$$\eta=\frac{nS_1}{BH}=\frac{nS_1}{B(h_{12},h_{23})H(h_{12},h_{23})}\tag{9.9-9}$$

式中，S_1为一个零件的面积；n为排样的排数。

条料的宽度 B 和进给步距 H 皆为h_{12}和h_{23}的函数，可用式（9.9-7）和（9.9-8）计算。

（3）排样过程

高度函数法的排样过程如图 9.9-18 所示。排样前首先进行数据处理，将图形信息转换成便于排样的数据形式。前置数据处理包括输入图形信息和排样方式、计算图形的面积、选取搭边值，并以二分之一的搭边值等距放大图形。对放大处理后的图形作多边形化处理，建立图形的自身坐标系。根据式（9.9-5）建立图形的高度函数表，以便于排样过程中调用。变量φ在其变化域〔0，2π〕内等分，例如等分数取为 120，计算精度取为搭边值的 5%。

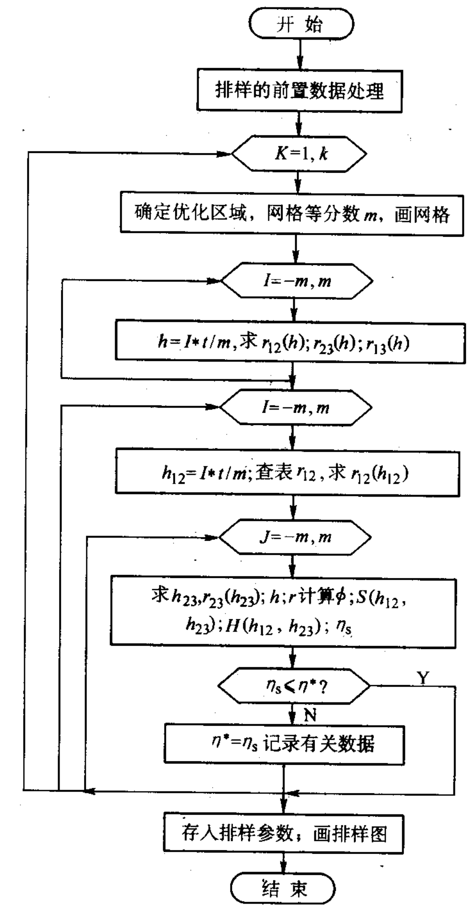


图 9.9-18 高度函数法的排样过程

数据准备完毕后，在h_{12}和h_{23}的变化域划分网格。为了在排样过程中快速使图形相切，在h_{12}和h_{23}的等分点上按式（9.9-4）计算r_{ij}的值，并列成数表。排样时用查表法可以很快求得 B 和 H 的值。在程序中进行了两次优化，首次优化搜索整个方形域 G，获得初步最优方案。然后，在最优解附近确定搜索区域 G'，并在此区域内以较小步距搜索，最终获得较精确的最优解。程序中将 G 域的边长分为 50 等份，将 G'域的边分为 20 等份。在微机上运行该程序，几秒钟便可完成优化排样计算。

3.4 平行线分割纵横平移法

下面将以四种常用排样方式中最有代表性、最复杂的对头双排为例来介绍该算法的原理。

如图 9.9-19 所示，设制件的搭边值为Δ，G_1是零件轮廓等距放大$\Delta/2$后的图形，G_2是G_1旋转 180°后的图形，G_1



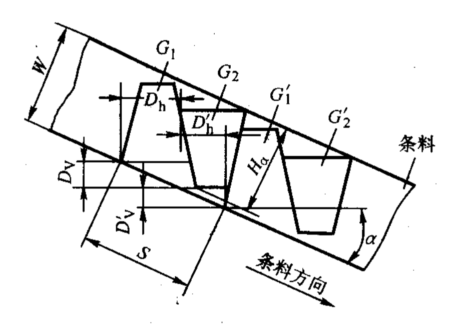


图 9.9-19　双头双排的排样参数

与 G_2 形成一个排样单元。G_1'和 G_2'分别是 G_1 与 G_2 沿条料方向移动步距 S 后得到的图形。如果由 G_1、G_2、G_1'、G_2'构成一个可能的对头双排方案，则必有如下三个约束条件成立。

① 在 G_1 中任取两个不重合的点 A_1、B_1，它们在 G_2、G_1'、G_2'中分别对应为 A_2、B_2、A_1'、B_1'、A_2'、B_2'，则必有：$A_1B_1 /\!/ A_2B_2 /\!/ A'_1B_1' /\!/ A'_2B'_2$，即排样时各图形的轴线平行。

② G_1 与 G_2，G_2 与 G'_1 至少有一点重合。

③ G_1、G_2、G'_1、G'_2 两两之间无重叠区域。

设制件的面积为 A，G_1 相对 G_2 的坐标为（D_h，D_v），G'_1 相对 G_2 的坐标为（D'_h，D'_v），G_2 的最高点为（X_u，Y_u），最低点为（X_b，Y_b）；在以条料方向为 X 轴的坐标中，G_2 最大和最小的 X、Y 坐标分别为 X_{max}、X_{min}、Y_{max}、Y_{min}，G_2 在条料方向的宽度为 H_α。如令：

$$D_x = D_h + D'_h$$
$$D_y = D_v + D_v'$$
$$G_v = Y_u - Y_b$$
$$M_x = X_{max} + X_{min}$$
$$M_y = Y_{max} + Y_{min}$$

则制件的旋转角度为：

$$\alpha = \arctan(D_y / D_x)$$

步距为：

$$S = \sqrt{D_x^2 + D_y^2}$$

条料的宽度可以由下式计算：

$$W = |D_x \sin\alpha + D_y \cos\alpha + (X_u + X_b - M_x)\sin\alpha + (Y_u + Y_b - M_y)\cos\alpha| + H_\alpha$$

材料利用率可以表示为：

$$\eta = 2A/（SW）$$

显然，在满足约束条件的情况下，D_v 与 D'_v 的取值范围为$[G_v, -G_v]$。对给定的 D_v 与 D'_v，如何快速地求出 G_1 与 G_2、G_2 与 G'_1 的相对水平位置 D_h、D'_h，是该算法的关键。

为了求解 D_h、D'_h，可把制件的等距放大图 G_2 沿纵坐标方向 N 等分，以水平线

$$Y_i = Y_{min} + i(Y_{max} - Y_{min})/N(0 \leqslant i \leqslant N)$$

来与 G_2 相交，通过求解方程得到相应当坐标（X_{1i}，X_{2i}，X_{3i}，X_{4i}，…，$X_{(n-1)i}$，X_{ni}）（n 为交点个数），这样，G_2 的轮廓可以看作是由一系列等距水平形线段（$X_{1i}X_{2i}$，X_{3i}，X_{4i}，…，$X_{(n-1)i}X_{ni}$，$(0 \leqslant i \leqslant N)$ 组成。

设 G_2 最右点与最左点的 X 坐标之差为 D_w，G_1 相对 G_2 的坐标为（$-D_w$，D_v）。如图 9.9-20 所示（为清晰起见，图中 G_1 与 G_2 之间留有间隔）。

令 $D_v = i(Y_{max} - Y_{min})/N(0 \leqslant i \leqslant N)$

则在纵坐标范围［$Y_b + D_v$，$Y_u - D_v$］内，构成 G_1 的水平线段与构成 G_2 的水平线段正好水平对齐。在此范围内，

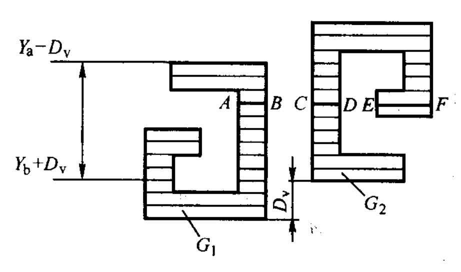


图 9.9-20　求解 D_h 的原理图

任取 G_1 的一段水平线段 AB，在 G_2 中与之对应的是水平线段 CD、EF。此时，水平移动 AB 使之不与 G_2 相交的解可以通过 AB、CD、EF 的端点坐标求得。定义此解为线段 AB 对 G_2 的可动区间，记为 $\bar{X}_{AB}$，则 $\bar{X}_{AB}$的形式如下：

$$\bar{X}_{AB} = \{x \mid x_1 \leqslant x \leqslant x_2,\ x_3 \leqslant x \leqslant x_4,\ \cdots,\ x_{n-1} \leqslant x \leqslant x_n,\ x_1 < x_2 < x_3 < x_4 < \cdots < x_{n-1} < x_n\}$$

设在纵坐标范围［$Y_b + D_v$，$Y_u - D_v$］内，G_1 有 m 条水平线段，每条水平线段对应的可动区间分别为$\overline{X_1}$，$\overline{X_2}$，…，$\bar{X}_{m-1}$，$\bar{X}_m$，则 G_1 对 G_2 的可动区间为

$$\bar{X}_{G_1G_2} = \overline{X_1} \cap \overline{X_2} \cap \cdots \cap \bar{X}_{m-1} \cap \bar{X}_m$$
$$= \{X \mid X_1 \leqslant X \leqslant X_2,\ X_3 \leqslant X \leqslant X_4,\ \cdots,\ X_{n-1} \leqslant X \leqslant X_n,\ X_1 < X_2 < X_3 < X_4 < \cdots < X_{n-1} < X_n\}$$

此即为 D_h 的取值。

类似地，可以求出 G_1 对 G'_1 的可动区间 $\bar{X}_{G_1G'_1}$。G'_1 对 G_2 的可动区间 $\bar{X}_{G_1'G_2}$（D_h'的解），G_2 对 G_2'的可动区间 $\bar{X}_{G_2G_2'}$，可分别由 $\bar{X}_{G_1G_2}$，$\bar{X}_{G_1G_1'}$导出。

由于 D_h 与 D_h'的值是一个取值范围，故在进行排样时，对组成 D_h 与 D_h'的各区间［X_{j-1}，X_j］进行等分，分别令 D_h、D_h'为各等分值，然后进行优化计算。

在进行优化排样前，可先求出 D_v 取值范围［0，（$Y_{max} - Y_{min}$）］内的各个 G_1 对 G_2 的可动区间 $\bar{X}_{G_1G_2}$，构成 G_1 对 G_2 的可动区间表。类似地，还需求出 G_1 对 G_1'，G_1'对 G_2，G_2 对 G_2'的可动区间表，供排样时查询。同时，也可利用可动区间表来判定两图形是否重叠，做法是：先求出两图形的相对位置，然后判断此相对位置是否包含在两图形的可动区间表中。如果包含，则两图形不重叠；否则两图形重叠。这样一来，优化排样时两图形是否重叠的判定就只需进行简单的数字比较，极大地提高了优化排样的速度。

在条料宽度的表达式中，H_α 是与零件的转角相关的。为了避免对某一 α 反复求解其 H_α，可在 α 的取值范围［0，π］内按一定精度等分，例如按 0.1°等分，然后求出各个角度的 H_α，形成高度函数表，供排样时查询。

综上所述，对头双排的优化排样算法可归纳如下。

1）获取冲裁件的轮廓信息，并将其等距放大 Δ/2（Δ 为搭边值），放大后的图形称为 G_1，并初始化 $\eta_0 = 0$。

2）将 G_1 用水平线沿纵坐标方向 N 等分，求得组成 G_1 的水平线段的坐标值。N 的取值应使相邻的水平线段间距小于 0.1 mm。

3）根据 G_1 与 G_2 的关系，利用 2）的结果求得组成 G_2 的水平线段的坐标值。

4）分别计算 G_1 对 G_2 的可动区间表，G_1 对 G_1'的可动区间表。

5）利用 4）的结果求 G_1'对 G_2 的可动区间表，G_2 对 G_2'的可动区间表。

6）将角度范围［0，π］按 0.1°等分，求高度函数表。

7）在 D_v 的取值范围$[G_v, -G_v]$内，取某一 D_v。

8) 在 D_v'的取值范围$[G_v, -G_v]$内，取某一 D_v'。

9) 求 G_1 与 G_2，G_2 与 G_1'，G_1 与 G_1'，G_1 与 G_2'，G_2 与 G_2'的相对位置。

10) 从 G_1 对 G_2 的可动区间表中查询 D_h 的值，用 0.1 mm等分其区间，然后取一具体的值。

11) 从 G_2 对 G_1'的可动区间表中查询 D_h'的值，用 0.1 mm等分其区间，然后取一具体的值。

12) 利用 G_1 对 G_1'，G_1 对 G_2，G_2 对 G_2'的可动区间表判断 G_1 与 G_1'，G_1 与 G_2'，G_2 与 G_2'是否重叠，如重叠，则转 11)，取另一 D_h'。

13) 计算零件转角 α、步距 S，然后查高度函数表，计算条料宽度 W。然后计算 η，如 η 大于η_0，则存储当前排样方案，令 η_0 等于 η。

14) 转 11)，取另一 D_h'，直到取完 D_h'为止。

15) 转 10)，取另一 D_h'，直到取完 D_h 为止。

16) 转 8)，取另一 D_v'，直到取完 D_v'为止。

17) 转 7)，取另一 D_v，直到取完 D_v 为止。

18) 输出最后存储的方案，即最优方案。

该算法的基本思想和实施方法，同样适用于普通单排、普通双排与对头单排的优化排样。其特点是对凸图形和凹图形都能得到完全正确的结果，能处理嵌套的情况，且运行速度相当快，仅需 10 ~ 30 s。

4 冲裁工艺方案的设计

冲裁工艺方案合理与否，直接影响产品的质量、生产率和模具寿命，所以工艺方案设计模块是冲裁模 CAD/CAM 系统的重要组成部分。冲裁工艺方案设计的主要内容包括选择模具类型，即采用单冲模、复合模还是连续模，以及确定单冲模和连续模的工步与顺序。

4.1 模具类型的选择

由计算机设计冲裁工艺方案，首先必须建立设计模型。在工艺方案设计中，选择模具类型通常遵循以下准则。

1) 制件的尺寸精度。当制件内孔与外形间或内孔间定位尺寸精度要求较高时，应尽可能采用复合模，这是因为复合模冲出的制件精度高。

2) 制件的形状与尺寸。当制件的料厚大于 5 mm，外形尺寸大于 250 mm 时，不宜采用连续模。若制件的孔或槽间(边) 距太小，或悬臂既窄又长时，不能保证复合模的凸凹模强度，故宜采用单冲模或连续模。

3) 生产批量。由于复合模和连续模生产率高，所以大批量生产的制件宜采用连续模或复合模。

4) 模具加工条件。复合模和连续模结构复杂，对加工条件要求较高。

上述准则中，有的可以用数学模型描述，有的则不便于用数学模型描述。例如，可以采用搜索和图形类比方法，由产品模型中求得最大外形尺寸、尺寸精度，判断孔、槽间距是否满足要求，凸模安装位置是否发生干涉等，从而确定能否采用复合模。对于不便于采用数学模型描述的条件，可采用人机对话方式，由用户根据生产实际情况作出决定。

模具类型选择的程序框图示于图 9.9-21。选择、判断的

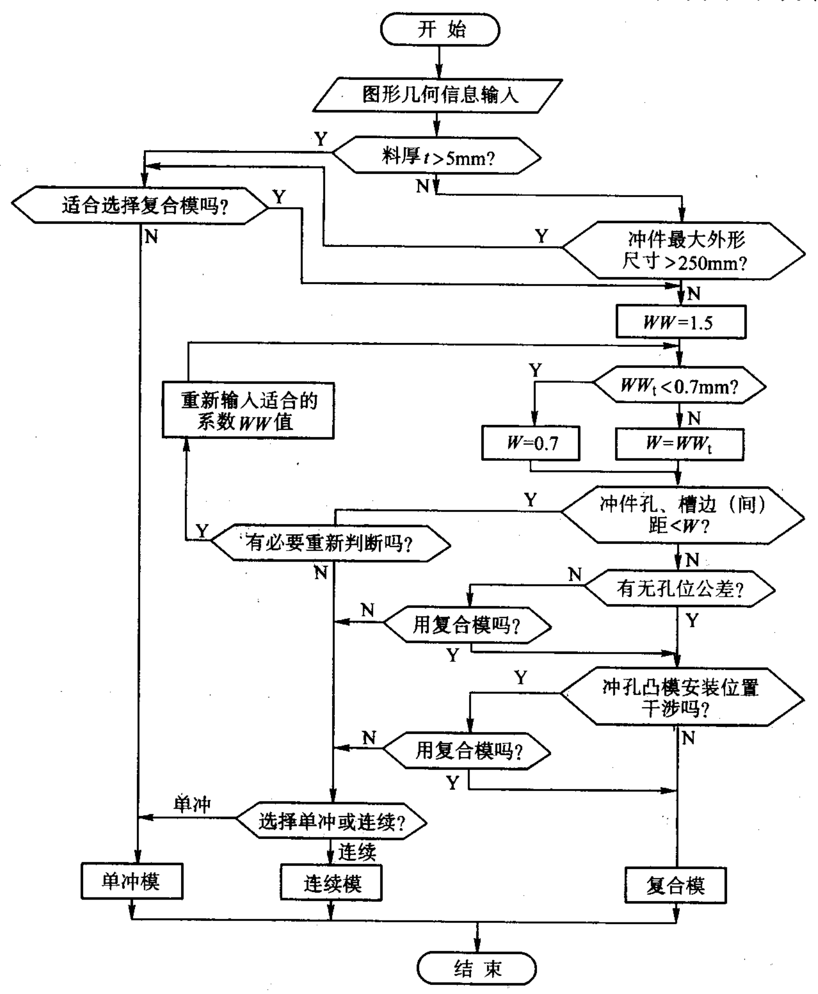


图 9.9-21 模具类型的选择过程



过程是按料厚、外形尺寸、孔槽间（边）距、孔位尺寸精度和凸模安装位置是否干涉的顺序进行的。在程序运行过程中，安排了数处人机对话。例如，当发现某一孔槽间（边）距小于 W（$W=1.5t$）时，询问是否有必要重新判断。用户可决定是否要对 W 值进行调整。当程序已判断不能使用复合模时，仍允许用户根据生产批量和模具加工条件等因素决定采用单冲模或连续模。这种将经验判断与程序自动判断相结合的方法，不仅可达到设计的高效率，而且可保证工艺方案的合理性。

在选择模具类型的程序中，冲裁零件的最大外形尺寸和孔、槽间（边）距可以自动确定。判断孔、槽间（边）距的值是为了保证复合模壁厚不小于一定的值，以保证其强度。为此，可将轮廓图形等距缩放一定值，然后判断各图形是相离还是相交。若内外轮廓或内轮廓间相交，则冲裁件的孔边（间）距不能满足复合模的要求。

4.2　连续模的工步设计

连续模是在压力机的一次行程中，在不同工位上完成多道工序的模具。在设计连续模时，首先进行工步设计，包括确定工步数，安排工序顺序和设计定位装置等。连续模的工步设计，直接影响模具的结构和质量。工步设计须综合考虑材料利用率、尺寸精度、模具结构与强度，以及冲切废料等问题。

连续冲裁模的工步设计一般遵循以下原则。

1) 为保证模具强度，将间距小于允许值的轮廓安排在不同工步冲出。

2) 有相对位置精度要求的轮廓，尽量安排在同一工步上冲出。

3) 对于形状复杂的零件，有时通过冲切废料得到制件的轮廓形状。

4) 为保证凹模、卸料板的强度和凸模的安装位置，必要时可增加空工步。

5) 落料安排在最后工步。

6) 为减小模具尺寸，并使压力中心与模具中心尽量接近，将较大的轮廓安排在前面的工步。

7) 设计合适的定位装置，以保证送料精度。

(1) 位置精度关系模型和干涉关系模型的建立

为了在工步设计时将有位置精度要求的轮廓放在同一工步，而将间距小于一定值的轮廓设置在不同工步，建立了位置精度关系模型和干涉关系模型。

冲裁件图形为多个轮廓的集合，可表示为

$$A=\{K_1, K_2, \cdots, K_i, \cdots, K_n\}$$

式中 K_i 表示组成冲裁件图形的第 i 个轮廓。定位尺寸有精度要求的轮廓组成了集合 A 上的一个关系 ρ_1。ρ_1 包括了全部有位置精度要求的孔。若两轮廓 K_i 和 K_j 间的定位尺寸有精度要求，则序偶（K_i，K_j）$\in \rho_1$。由 ρ_1 可形成位置精度关系矩阵

$$M_1=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

$$a_{ij}=\begin{cases} 1 & 若 (K_i, K_j) \in \rho_1 \\ 0 & 若 (K_i, K_j) \notin \rho_1 \end{cases}$$

式中，$1\leqslant i$，$j\leqslant n$，n 为轮廓个数。

为了确定关系 ρ_1，必须判别各轮廓间的位置尺寸关系。冲裁件图形的输入方法不同，建立的冲裁件几何模型不同，判别轮廓间位置尺寸关系的方法也不相同。

为保证凹模的强度，须使各型孔间的壁厚大于一定值。为此，可将冲裁件图形的内轮廓等距放大，然后判断各等距放大图形是否相互干涉。相干涉的轮廓组成了冲裁件轮廓集合 A 上的关系 ρ_2。若两轮廓 K_i 和 K_j 间相互干涉，那么序偶（K_i，K_j）$\in \rho_2$。与位置精度关系类似，可形成干涉关系矩阵

$$M_2=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix}$$

$$b_{ij}=\begin{cases} 1 & 若 (K_i, K_j) \in \rho_2 \\ 0 & 若 (K_i, K_j) \notin \rho_2 \end{cases}$$

式中，$1\leqslant i$，$j\leqslant n$，n 为轮廓个数。

矩阵 M_1 和 M_2 皆为对称矩阵，这是因为位置精度关系和干涉关系具有对称性的缘故。程序在自动完成工步设计时，以矩阵 M_1 和 M_2 为参考矩阵，便可将有位置精度要求的轮廓置于同一工步，而将间距小于允许值的轮廓安排在不同工步。

(2) 工步的设计过程

图 9.9-22 所示为一个冲裁模 CAD/CAM 系统设计连续模工步的过程。首先，输入冲裁件的几何模型和优化的毛坯排样方案。接着，搜索确定定位尺寸有精度要求的内轮廓，形成位置精度关系矩阵 M_1。

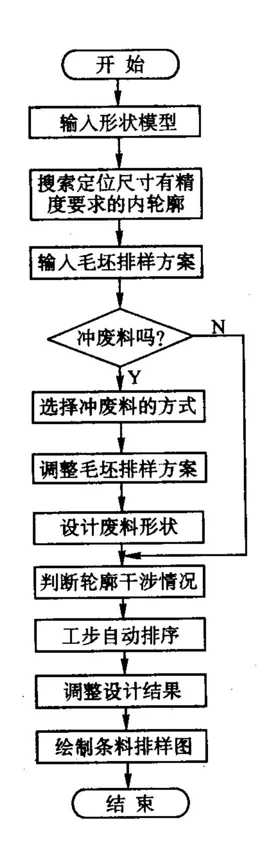
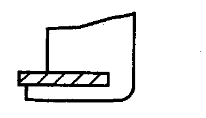


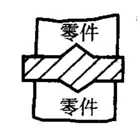
图 9.9-22　工步设计流程图

为避免过长的悬臂和窄槽，以保证凸模和凹模的强度，有时采用冲切废料的方式冲出零件轮廓。有许多尺寸小、形状复杂的零件，只有用切废料的方法才能冲出。程序可设计三种形式的废料形状，即局部废料、对称双排套裁废料和完全冲废料（图 9.9-23）。对于完全冲废料的情况，以后不必设置落料工步。根据选择的废料形式，可对毛坯排样方案加以调整，以便于废料的冲制。废料形状的设计采用在屏幕上交互作图的方法完成。设计的废料轮廓形状将与原零件的轮廓一起参与工步排序。

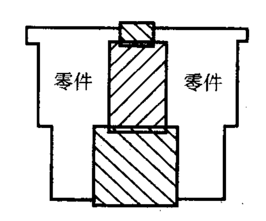




(a) 局部废料



(b) 双排套裁废料



(c) 全冲废料

图 9.9-23　三种形式的废料

在建立了位置精度关系模型和干涉关系模型之后，工步排序的问题即转换为将轮廓集合 A 划分为若干子集 B_i 的问题，即存在以下关系：

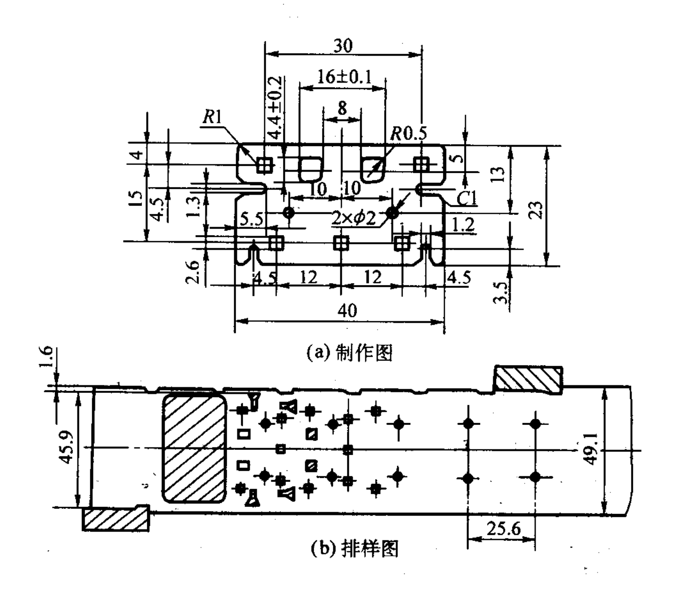
$$\bigcup_{i=1}^{m} B_i = A$$

每个子集为一个工步上冲制轮廓的集合，子集的个数即为工步数。

自动排序时，尽量将有位置精度要求的轮廓分配在同一工步。因此，对于轮廓 K_i 和 K_j，如果矩阵 M_1 的元素 $a_{ij}=1$，则尽量分在同一工步。对于互相干涉的轮廓，自动排序时须将其分配在不同工步。所以，对于轮廓 K_i 和 K_j，若矩阵 M_2 的元素 $b_{ij}=1$，则将其分在不同工步。冲制定位孔的工步放在开始位置。除完全冲废料的情况外，落料工步布置在最后。为了使压力中心和模具中心尽量接近，并减小模具尺寸，在工步排序时将轮廓周长较大子集排列在前面的工步。

由于影响工步设计的因素很多，并且有些因素，例如生产条件、模具加工能力等，难以定量描述，所以完全依靠自动设计工步，有时会产生与实际条件不相容的设计结果。因此，工步自动安排完毕后，将条料排样图显示在屏幕上，用户可操纵光标移动轮廓形状，改变轮廓组合，设置空工步，增加工步数，直至获得满意的工步设计。

图 9.9-24 为一冲裁件的条料排样图。



(a) 制作图

(b) 排样图

图 9.9-24　条料排样图

5　冲裁模结构设计

5.1　冲裁模结构设计子系统的功能结构

冲裁模 CAD/CAM 系统中的结构设计子系统完成简单冲裁模、复合冲裁模和级进冲裁模的结构设计。系统包括总装设计模块、零件设计模块、结构修改模块、工程绘图模块及零件图管理模块五大部分。总装设计模块进行总装关系、总装位置的设计和总装图的生成；零件设计模块完成模具零件形状及尺寸的设计，数据库和图库存储模具标准零件与模具标准结构；工程绘图模块为用户提供快速生成剖面线、指引线等功能；零件图管理模块对模具中所有零件进行管理，允许用户随时调用零件图或总装图以便进行修改和编辑。模具结构设计系统的功能结构如图 9.9-25 所示。

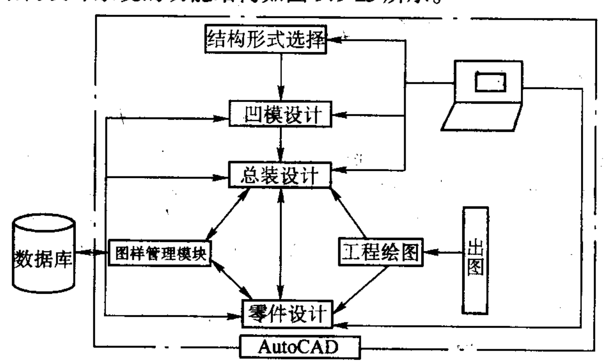


图 9.9-25　结构设计子系统功能结构

模具结构设计模块是以 AutoCAD 为支撑软件，经过二次开发形成的。系统的所有模块由一个主控菜单进行管理，用户通过调用屏幕上的菜单驱动各功能模块。各功能模块相互独立，模块间的数据交换按一定的数据结构实现。

5.2　总装图设计

如何快速生成模具总装图是当前模具 CAD 的一个重要研究课题，由于装配图视图复杂，给计算机绘制带来很大的困难，简单的图形叠加，不能清楚地描述各零件间的装配关系，不便于总装图的修改。在这里模具结构 CAD 采用以零件为对象，通过定义零件在总装中的安装关系，采用连动的方法进行总装图设计。在冲裁模具设计中，将模具零件分为板类和杆类。板类包括上下底板、凹模板、垫板、固定板等；杆类包括凸模、螺钉、销钉、推杆等。板类零件的安装关系主要为平面接触关系，即上平面与哪块板接触，下平面与哪块板接触；杆类零件的安装关系即为穿过的关系。

如图 9.9-26 所示，在图中上底板、凸模固定板、垫板中穿过一螺钉，其设计过程如下。

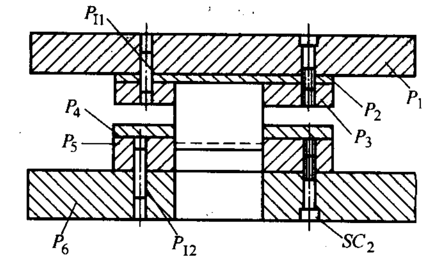


图 9.9-26　冲裁模装配设计

1）选择螺钉穿过的板件，如图中的上底板、垫板、凸模固定板。

2）利用参数化，输入螺钉的各尺寸。

3）根据螺钉穿过的板件及位置，画出螺钉图。



4）对穿过的各板，根据板与螺钉的安装关系及相对位置计算出此板与螺钉的安装孔形状尺寸。如固定板与螺钉为螺纹安装关系，则程序根据螺钉的位置，在固定板的对应位置上绘出螺纹孔。

面向零件的设计方法，使模具总装图中剖面线绘制、指引线、明细表的生成速度加快，如在剖面线绘制模块中，用户只需用光标点取所要绘制剖面线的零件，程序则自动根据零件名过滤掉总装图中其他零件。如要绘制图9.9-26中凸模固定板的剖面线，用户用光标点取固定板后，程序通过对总装图过滤得到要绘制剖面线的图形为图9.9-27a，然后程序根据图9.9-27a中各形状特征的性质，进行图形并、交、差运算，由此确定绘制剖面线的区域，如图9.9-27b所示的封闭环。最后，对这些封闭环逐个绘制剖面线（图9.9-27c），完成一个零件的剖面线的绘制（图9.9-27d）。

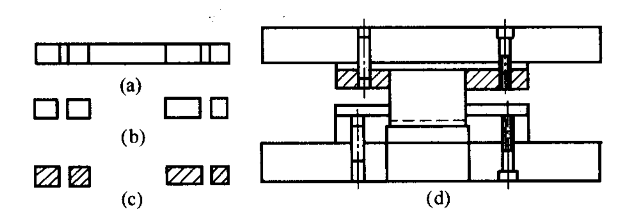


图9.9-27 剖面线绘制过程

5.3 凹模和凸模设计

凹模和凸模设计分为刃口尺寸计算、标注和外形设计两部分。

（1）刃口尺寸计算与标注

CAD系统中冲裁模刃口尺寸计算的基本原则与手工计算相同。落料件应以凹模为设计基准；冲孔时则以凸模作为设计基准。同时应考虑刃口在使用过程中将有磨损，落料件尺寸随凹模刃口尺寸的磨损而增大，而冲孔的尺寸则随凸模的磨损而减小。将随磨损而增大的尺寸定义为 A 类尺寸，变小的尺寸定义为 B 类尺寸，而磨损后不产生变化的尺寸为 C 类尺寸，同时考虑手工设计时将落料与冲孔分开，但实际上落料模中的 A 类尺寸与冲孔模中的 B 类尺寸属于同一种型式，为便于计算机处理，故统一成三类尺寸：

$$A_D = (A_{max} - x\Delta)^{+\delta}_{0}$$

$$B_D = (B_{min} + x\Delta)^{0}_{-\delta}$$

$C_D = (C_{min} + 0.5\Delta) \pm \delta$（当制件为 $C^{+\Delta}_{0}$ 或 $C^{0}_{-\Delta}$）

$C_D = C \pm \delta$（当制件为 $C \pm \Delta$）

式中，A_D、B_D、C_D 为分别为三类模具刃口尺寸；A_{max}、B_{min}、C_{min}为相应制件最大或最小尺寸；Δ 为制件公差；δ 为模具制造公差。

由上述计算公式可见刃口尺寸计算主要需区别三类尺寸。识别三类尺寸的方法，一种是可以从产品图输入时建立的几何形状与尺寸关系模型中认别。第二种是采用“刃口磨损模拟法”，该方法的基本原理是按照落料件尺寸在刃口磨损后增大、冲孔则减小的原则将图形进行放大与缩小，然后建立一新的几何图形，计算出该图的节点坐标，利用相关点求出新图形的相关尺寸，最后将新图形的相关尺寸与原始尺寸逐一进行比较，即可完成全部尺寸的类型认别。

刃口尺寸的标注可以从产品模型中进行搜索，首先将尺寸自动排序并进行标注，然后用交互设计方法进行修改。

在刃口尺寸半自动标注过程中，常常对于形状全等的所有刃口只标注一次，因而，系统应具备判断全等图形的功能，其算法分三步进行。首先，根据组成图形的元素总数、直线总数和圆弧总数是否相同，找出可能会全等的图形；然后，再从满足上述条件的图形中依次取三点组成三角形，判断各图形对应的三角形是否全等，确定出初步全等图形；最后，通过判断图形上对应的弧所形成的弓形是否全等来确定是否全等的图形。

（2）凹模设计

凹模的外形尺寸应保证凹模的强度，以承受冲裁时的载荷。凹模的外形通常是方形或圆形，凹模的外形尺寸的计算方法是根据凹模的刃口尺寸最大值 b 和冲裁件的材料厚度 t，查表确定凹模的厚度和刃口距凹模边缘的壁厚 c；然后再依据模具中心与压力中心重合的原则确定凹模的外形尺寸及刃口的位置。

凹模的刃口部分有图9.9-28所示的四种形式，选用哪种型式用户用光标进行选择，这四种刃口部分的台阶高度和锥度，由程序根据料厚自动查表确定。凹模的设计过程如图9.9-29所示。

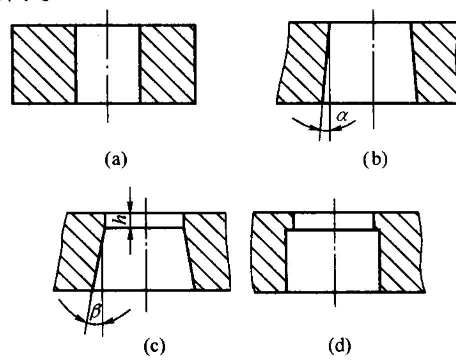


图9.9-28 凹模型式

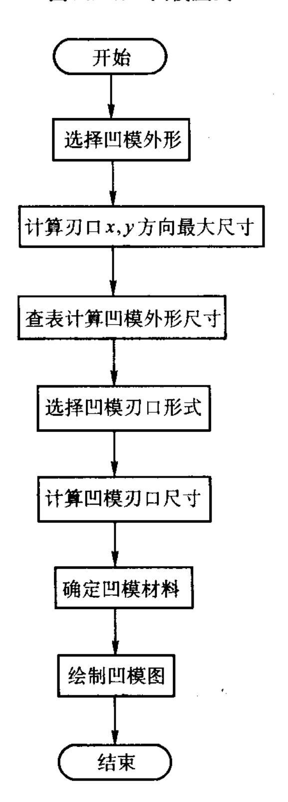


图9.9-29 凹模设计流程图

（3）凸模设计

凸模设计模块可以完成图9.9-30所示的凸模设计，凸模的型式由用户利用光标在菜单中选择。凸模的长度可由用户交互输入，亦可由程序通过计算用户点取的二板间的距离自动确定。凸模上其他尺寸也可由用户交互输入，或查找数据库确定。程序自动生成凸模图。此外，程序根据凸模的安



装位置，自动计算出凸模穿过的板上的孔形及尺寸。凸模的设计过程如图 9.9-31 所示。

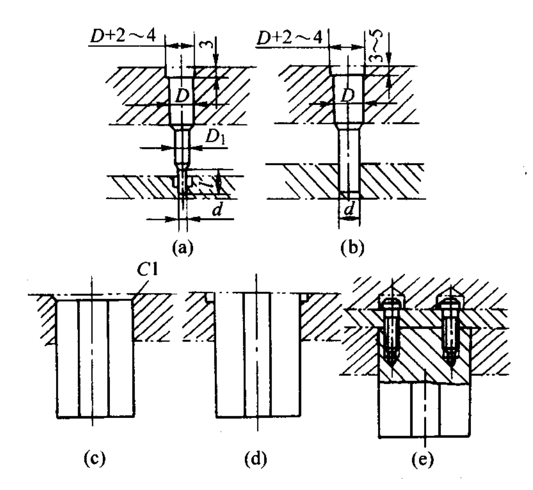


图 9.9-30　凸模型式

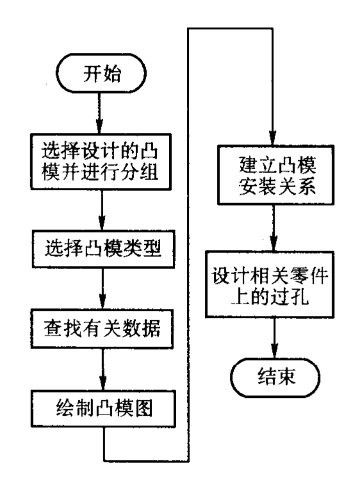


图 9.9-31　凸模设计过程

5.4　顶杆的优化布置

为了将工件或废料从凹模中推出，需要设计顶料装置，包括推板、顶杆、打板和打杆等零件。这里介绍一种优化布置顶杆的方法。

图 9.9-32 给出了顶杆的几种布置方式。顶杆的合理设计与布置应满足以下条件。

1）顶杆的合力中心应尽可能地接近冲裁件的压力中心。

2）顶杆应靠近冲裁件轮廓边缘，均匀分布。

3）在某些特殊部位（如工件的窄长部分）须安放顶杆。

4）顶杆的直径和数目要适当。

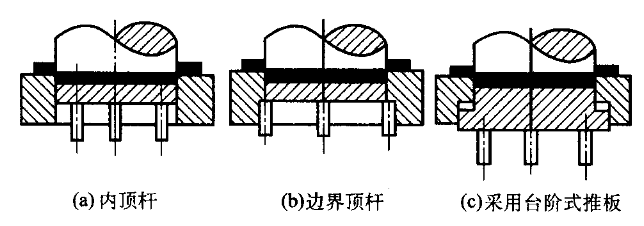


图 9.9-32　顶杆的布置方式

顶杆的直径和数目一般可根据零件尺寸、顶件力的大小和材料性质等条件，由强度或失稳条件计算。顶杆的直径和数目可用交互方式决定，也可先由用户根据工件的形状和尺寸选择顶杆直径，由以下公式计算顶杆数目 n。

$$n=\begin{cases}\dfrac{64K_s F_e H^2}{\pi^3 ED^4}, \lambda \geqslant 100\\[2mm] \dfrac{4K_s F_e}{\pi D^2(A-B\lambda)}, 60 \leqslant \lambda < 100\\[2mm] \dfrac{4F_e}{[\sigma]\pi D^2}, \lambda < 60\end{cases}$$

式中，D 为顶杆直径；H 为杆长；K_s 为安全系数；F_e 为顶件力；A、B 为和材料性质有关的系数，当 $\sigma_s > 480$ MPa 时，$A = 46.9$ MPa，$B = 26$ MPa。λ 为顶杆的相对长度，计算式为

$$\lambda = \frac{H}{\sqrt{J/S}}$$

式中，J 为最小惯性矩；S 为顶杆横截面积。

推板分台阶式和无台阶两种。当需要在零件轮廓范围之外布置顶杆时，通常采用台阶式推板。

顶杆位置的确定是顶杆设计程序的难点和关键，下面对此问题加以讨论。

（1）优化目标函数的建立

顶杆布置是一个具有约束条件的多目标优化问题。根据布置顶杆的要求，可以确定两个优化目标。

1）顶杆的合力中心与冲裁件压力中心的距离

$$f_1(x,y) = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} - x_0\right]^2 + \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} - y_0\right]^2$$

2）顶杆所围成的多边形周长的倒数

$$f_2(x,y) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n-1}\sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} + \sqrt{(x_1 - x_n)^2 + (y_1 - y_n)^2}}$$

式中，x_0、y_0 为工件压力中心的坐标；n 为顶杆个数；x_i、y_i 为第 i 个顶杆中心的坐标。

用下面的方法建立评价函数，可以将多目标的优化问题转化为单目标优化问题：

$$U(X) = \sum_{j=1}^{m} \lambda_j f_j(X)$$

其中，$U(X)$为多目标的评价函数；$f_j(X)$为单个目标函数的值；λ_j 为加权系数；m 为目标函数的个数。

加权系数 λ_j 的取值反映了对各个目标的估价，可取为

$$\lambda_j = \left(\min_{X\in D} f_j\ (X)\right)^{-1}$$

即将各单目标函数最优值的倒数取为加权系数。这种确定加权系数方法所形成的评价函数反映了各个单目标值离开各自最优值的程度。

（2）约束条件的处理

由于冲裁件内外轮廓的复杂性，无法用一组固定格式的约束函数来解析表示随冲裁件形状变化的约束条件。为了增加程序的通用性和使问题可解，引入了划分网格的方法，将有约束的优化问题转化为无约束的优化问题处理。

解除约束条件的做法如下。

1）利用图形输入程序建立的关于产品零件形状的函数模型和求得的结点坐标，用一系列等间距坐标点将内外轮廓离散化，即用加密点近似图形的轮廓（图 9.9-33a、b）。

2）在冲裁零件图形的外切矩形内划分网格，网格的边长等于顶杆的直径（图 9.9-33c）。

3）根据与图形轮廓的相对位置，网格可分为边界网格、内网格和外网格。跨越边界轮廓的网格为边界网格。外网格为轮廓以外的网格，即外轮廓以外和内轮廓以内的网格。零件图形内部的网格为内网格，亦称可行网格。显然，每一可行网格对应着顶杆的一个可能布置的位置。约束条件转化的



关键在于搜索出所有的可行网格（图 9.9-33d）。对于台阶推板的情形，应将推板的轮廓作为区分网格类型的依据。

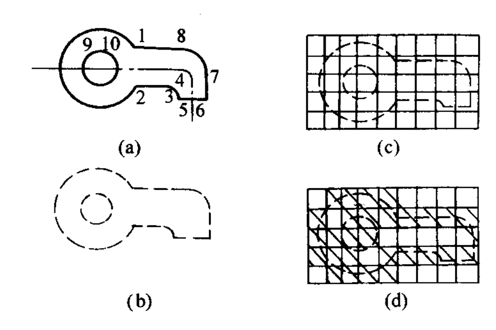


图 9.9-33 网格的划分

(3) 可行网格的确定

可行网格的不同组合方式将构成不同的顶杆布置方案，因此区分可行网格有助于减少搜索的盲目性和加速布置顶杆的过程。程序中，三维数组 $WG(N,M,3)$ 用以记录网格的特征，其中第一维数组元素为网格所在的行号；第二维数组元素为网格的列号；第三维数组元素用以记录网格中心点的坐标以及网格的属性，即指出是否属于边界网格。对于边界网格，则记录其所属的轮廓号，外轮廓编号为 1。内孔编号为 2，3，…。该信息对于确定可行网格起着十分重要的作用。

如图 9.9-34 所示，可以利用图形的封闭性来检测可行网格。若一网格的同行（或同列）的两边中任何一边未被边界网格所封闭，则此网格一定为非可行网格。图中标号为 3 的网格即属此种情况。若一个网格的同行或同列的两边被编号为 2 或 2 以上的同一编号的边界网格所封闭，那么该网格亦为非可行网格。图中标号为 2 的网格位于孔内，它被编号为 2 的边界网格所封闭，所以可判定为非可行网格。

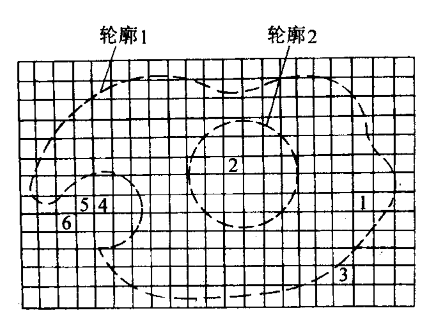


图 9.9-34 可行网格的确定

检测网格的上下左右是否封闭是确定可行网格的基本依据，这构成了算法的第一个步骤。但是，余下的网格也并非一定为可行网格。例如，图 9.9-34 中标号为 4 的网格同行和同列均被编号为 1 的边界网格所封闭，但它却是非可行网格。类似的情况也可能发生在孔内。这些非可行网格不会在第一步骤里被检测出来，所以程序安排了第二步骤。采用在第一步骤中已检测出的非可行网格为基础，在剩余的网格中进一步筛除非可行网格。图中标号为 6 的网格在第一步骤中被检测为非可行网格，在第二步骤中，它将非可行性信息传递至标号为 5 的网格。后者又将非可行性信息传递给标号为 4 的网格，如此进行下去，可完成确定可行网格的工作。

在这里，可行网格即为优化计算时的可行域。这种优化布置顶杆方法的一个基本特点就是可行域用网格的占据状态表示，从而避免了解析表示时的困难。确定可行网格之后，程序将在可行域内构造可行方案，并从所有可行方案中选出最佳者。

(4) 保证顶杆均匀分布的方法

为了使顶杆尽可能地均匀分布，程序中采用了如下方法。

1) 过冲裁件的中心作水平和铅垂线，将可行网格分为四个区。设各区的网格数为 K_1、K_2、K_3、K_4，各区拟安排的顶杆数为 n_1、n_2、n_3、n_4，则在布置顶杆时应尽可能满足以下关系：

$$\frac{n_1}{K_1}=\frac{n_2}{K_2}=\frac{n_3}{K_3}=\frac{n_4}{K_4}$$

2) 当可行网格较多时，任一可能的顶杆位置一旦确定，就不再选择相邻的网格与之组合。

3) 在布置前，将明显的不适宜安排顶杆的可行网格删除。这样，既保证了顶杆布置方案的合理性，也提高了设计的效率。

由于采取了以上措施，使顶杆的分步比较均匀，运算量也大大减少。

(五) 程序的结构

图 9.9-35 为顶杆设计程序的框图。在输入了冲裁零件的形状信息和其他包含推件力等参数的数据文件后，程序将计算出顶杆的直径和数目，并将计算结果显示给用户。如果不同意计算的结果，可以用交互方式输入设计者自己确定的数值。

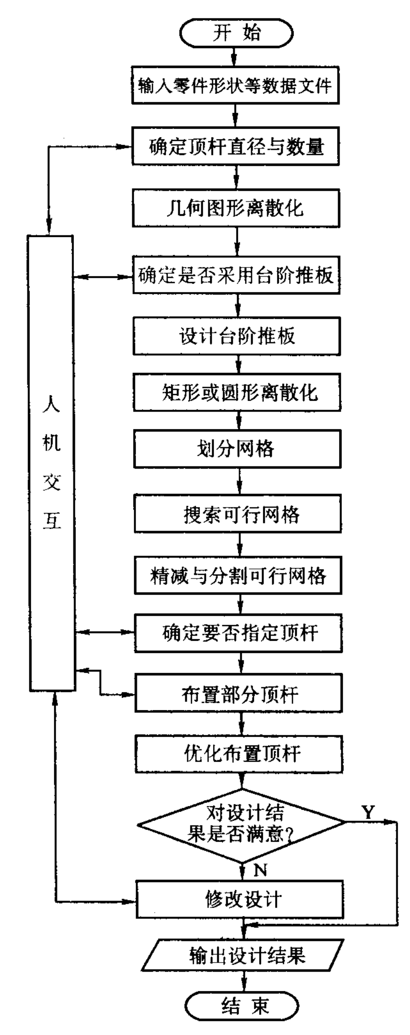


图 9.9-35 顶杆设计程序的框图

在将图形轮廓离散化之前，以交互方式确定是否需要采用台阶推板。图形轮廓离散化之后，程序按前面所述的方法自动划分网格，将网格分类，确定布置顶杆的可行域。接着，程序将可行网格分割为四个区域，确定每个区域中应布置顶杆的个数，删除不适于布置顶杆的可行网格。在自动优



化布置顶杆之前，使用者可用交互方式在某些部位预先设置一些顶杆。顶杆的优化布置包括求取单个目标函数的最优值、构造评价函数和最终优化等步骤。程序采用的优化方法为网格搜索法。最后，程序将优化结果显示输出。如果使用者对设计结果不满意或需做某些修改，可以通过人机交互作用实现其意图。

6 级进模 CAD 的内容与系统结构

6.1 级进模的设计内容与过程

级进模是冲模的一种，又称为连续模，是在压力机的一次行程内，在模具的不同工位上完成多道冲压工序。一个复杂的冲压零件，用一副多工位级进模即可冲制完成，一副模具上往往有数十个工序。由于受模具与压力机大小的限制，一般级进模只能用于中、小零件的生产。

级进模设计内容包括工艺性分析、毛坯展开、毛坯排样、条料排样、压力与压力中心计算、压力机选择、模具结构设计与模具图绘制。其中，毛坯排样、压力与压力中心计算与冲裁模设计一样，故这里不再介绍。

(1) 工艺性分析

工艺性分析是判断冲压件成形的工艺可行性，即判断该产品零件是否符合冲压工艺的要求。

例如，对于弯曲件，要求弯曲处的圆角半径不能小于最小弯曲半径，弯曲直边长度不宜过小，否则回弹大；若弯曲件上有孔，则要求孔壁与弯曲处有适当距离，以防止孔变形，否则应先弯曲后冲孔。对于拉深件，圆角半径不能过小，否则容易破裂；拉深件上的孔均在拉深后冲制。工艺分析还包括冲压件精度分析等。

(2) 毛坯展开

毛坯展开是将弯曲件或拉深件展成平板毛坯，形成毛坯展开图。

弯曲件毛坯展开通常是根据板料弯曲时应变中性层长度不变的原则，确定其展开长度和尺寸。

对于拉深件，其毛坯展开方法根据产品形状不同而定，对称旋转零件采用成形前后面积相等的原则，不考虑材料厚度的变化。对于匣形件，则圆角部分按拉深毛坯展开，直边部分按弯曲展开。

(3) 条料排样

条料排样包括冲压件每道加工工序性质、形状、尺寸的设计与计算，工序的排列与布置，载体设计以及定位方式的选择与位置布置等。其中，载体是条料的一部分，载体与制件，或制件与制件之间连接部分称为搭边。载体的作用主要是运送制件到各工位进行冲裁、弯曲、翻边、拉深、成形等，并且能使制件在冲压过程中始终保持送进稳定、定位准确，顺利地加工。载体设计包括载体形式选择与尺寸计算。条料排样完成后，凹模工作部分的布置与形状也就基本上确定了。条料排样直接关系到模具各工序加工的协调与稳定，关系到冲压件精度、加工效率、材料利用率以及模具结构的复杂程度与寿命。因此，条料排样是级进模设计中关键的一步，是模具结构设计的主要依据。

(4) 模具结构设计

模具结构设计时，首先进行模具结构形式的选择，包括送料、卸料、托料、导向、定位方式的选择以及凹模与凸模形式的选择（整体式、拼块式、嵌块式），进而确定辅助装置，如安全装置、保护装置、限位装置等。

模具结构设计完成后即可进行总装配图设计，确定各模具零件的结构形式及尺寸。图 9.9-36 为多工位级进模设计一般过程。

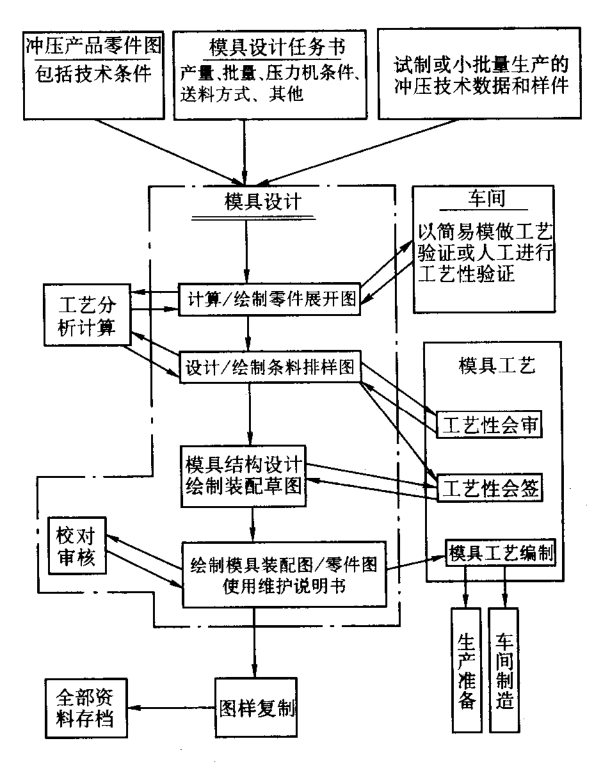


图 9.9-36　多工位级进模设计步骤

由上述内容可知，级进模设计过程是很复杂的，级进模的加工精度要求也很高。除此之外还具有以下特点。

1）经验性。手工设计级进模时，其条料排样与结构设计主要由技术人员凭经验，考虑产品成形的可能性及结构的合理性进行设计，没有一套完整的设计准则可行。因此，建立 CAD 系统时必须总结技术人员的经验，按板料成形规律建立一套系统的设计准则。

2）不确定性。因为级进模设计主要是凭个人的经验，因此同一产品零件，由不同人进行模具设计时，其所采取的方案往往不同，所以在 CAD 系统中不仅要建立标准结构，而且要有优选方案的功能。

3）调试及计算机模拟。由于级进模设计的成功与否主要取决于人的经验，因此往往一副模具设计与加工完后，必须经过生产中的调试、修配才能投入正式生产。为了缩短生产周期，在 CAD 系统中应进一步采用计算机模拟技术，以便对冲压件的成形状态与模具运动情况进行检查，达到减少模具调试时间的目的。

6.2 级进模 CAD 系统的结构

冲压成形工艺的设计，是一非常复杂的设计任务，需考虑诸多因素。而且，级进模结构本身亦非常复杂，有时多达上百个零件，这就要求级进模 CAD 系统应具有相应的灵活性、易操作性，以使用户能方便快捷地完成级进模设计。另一方面，各个企业所采用的级进模结构形式、设计方法及相关标准都有所不同，这就要求系统应具有相应的可扩充性，使用户可根据自己的需要，对系统进行定制处理，以满足设计要求。

根据级进模设计的性能要求和系统的功能需求，可建立如图 9.9-37 所示的级进模 CAD 系统的总体结构。

1）基于特征的冲压工艺设计。影响冲压成形工艺设计的因素很多，目前还难以实现自动设计。采用基于特征的设计方法，可将交互和自动处理有机地结合在一起。该功能模块主要包括毛坯展开、毛坯排样、条料排样及显示处理等功能。

2）模具结构及零件设计。模具的装配结构决定了模具



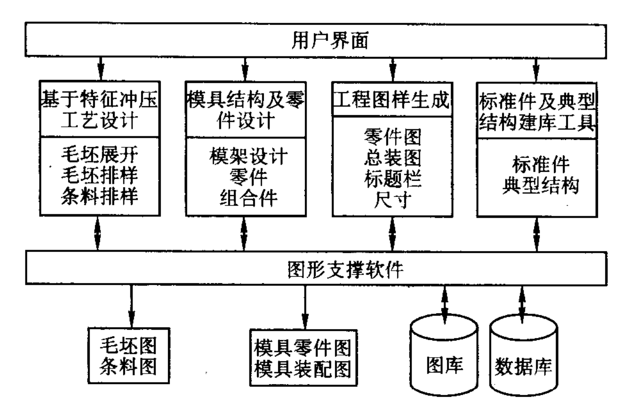


图 9.9-37 级进模 CAD 系统的总体结构

零件的形状及尺寸，同时模具零件反过来又会影响模具的装配结构。为保证设计结果的一致性，同时使设计过程符合设计人员的习惯，模具结构及零件的设计采用自上向下的设计方法，设计人员直接在装配结构中设计相关的模具零件。该功能模块主要包括模架设计、工作件设计（凸模、凹模等）、标准件选用及辅助装置设计等功能。

3）工程图样生成。由于工程图样是模具制造过程中不可缺少的技术文件，为此，需提供相应的功能来快速生成符合要求的工程图样。该功能模块主要包括：自动坐标尺寸标注标及交互调整、标题栏生成、技术要求及其他相关符号的标注等功能。

4）模具标准件及典型结构建库工具。在级进模设计过程中，需采用大量的标准件和典型结构。由于标准化工作目前还不很完善，不同的企业会有不同的标准，因此，级进模 CAD 系统应提供一建库工具，以使用户定制符合本企业规范的标准件和典型结构库。该功能模块主要包括标准件建库、典型结构建库及实例化处理等功能。

6.3 系统的功能模块

根据前述的级进模 CAD 系统的总体结构和模具设计过程的特点，在系统实现时，将相关功能组合在基于特征的冲压工艺设计和级进模结构及零件设计两大模块中。

（1）基于特征的冲压工艺设计功能模块

在该功能模块中，组合了工艺设计相关的内容，如毛坯展开、毛坯排样和条料排样等。不同的特征所对应的冲压工艺设计内容和设计方法是不同的，如弯曲特征的弯曲冲压工艺设计与板特征的废料设计差别很大。因此，需针对不同的特征类型提供相应的处理方法。为定位条料，还需设计附加工艺形状，如导正孔和侧刃孔等。另外，在交互设计过程中，经常需对设计结果进行调整，如工序移动、删除和插入空工位等。图 9.9-38 示出基于特征的冲压工艺设计模块的功能组成。

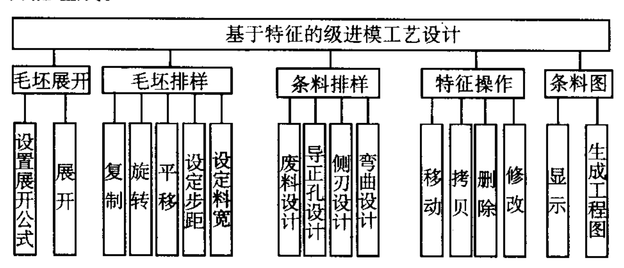


图 9.9-38 基于特征的冲压工艺设计功能组成

（2）级进模结构及零件设计功能模块

该功能模块包括：模架设计及标准件选用模块、工作零件设计模块、辅助设计模块和图样生成模块、标准件及典型结构建库工具。下面分别对各模块的功能进行介绍。

1）模架设计及标准件选用模块。完成模架及标准件设计。模架的基本组成包括上模座、下模座、凸模垫板、凸模固定板、卸料板、卸料垫板、凹模板和凹模垫板。根据需要可改变垫板的数量。设计时，用户交互输入条料的相关尺寸，随后，系统从典型结构库中调出相应的图形和数据文件，并将其实例化后插入到相应的位置。

2）工作零件设计模块。用于完成工作零件的自动设计，如冲裁凸模、冲裁凹模和标准冲裁凸模的设计。

3）辅助功能模块。用于完成装配图中零件的删除、板件开孔的操作。

4）图样生成模块。用于完成从装配图中生成零件图的功能，包括图形生成、尺寸标注、技术要求编制及零件图管理等。

5）标准件及典型结构建库工具。该模块提供级进模中所有标准件或常用零件及典型结构的参数化建库功能。

图 9.9-39 所示为级进模结构及零件设计功能模块的组成。

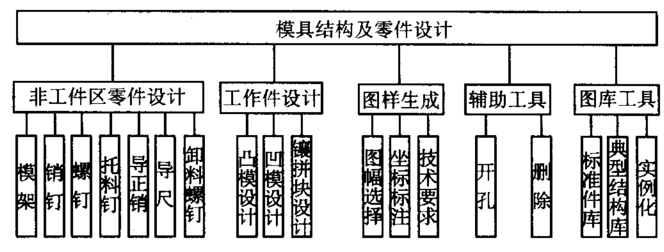


图 9.9-39 级进模结构设计功能模块组成

7 基于特征的连续冲压工艺设计

7.1 钣金零件的单元特征模型

钣金零件的产品信息是级进模 CAD 系统的基本输入信息。为了实现基于特征的冲压工艺和模具结构及零件的设计，钣金零件的产品信息以特征模型的方式输入到级进模 CAD 系统。因此，需首先建立钣金零件的特征模型。此处介绍钣金零件单元特征模型的信息结构及组成，以便于后续讨论基于特征的冲压工艺设计方法。

如何根据钣金零件的特点，构造适当的钣金零件特征模型，使其既便于完整有效地描述钣金零件，又便于后续的冲压工艺设计模块提取所需信息，是实现级进模 CAD 系统的关键技术之一。根据钣金零件的冲压成形特点，采用面向冲压加工的单元特征建模方法，可有效地解决这一问题。

（1）钣金零件的形状特点

钣金零件一般是由平板或带料毛坯经过成形、弯曲和冲裁等工序加工而成。不同的加工方式会产生不同的形状。从钣金零件的变形特点来看，弯曲变形及拉深变形是产生钣金零件复杂空间形状的主要变形方式，而其他变形方式一般只是在板面上产生凸起、凹陷、缺口、孔等局部形状。钣金零件的这些特点，是面向冲压加工对钣金零件的形状特征进行分类的依据。表 9.9-1 列举了常见的 12 种钣金零件特征。

表 9.9-1　常见钣金零件设计特征

产品特征类型	产品特征截面图
平板	
拉深	
弯曲	
撕口	
孔	
翻边	
卷圆	
局部成形	
切口	
压肋	
压印	
搭桥	

(2) 钣金零件的特征分类

由上述分析可知，钣金零件的形状特点实际上可由其变形特点决定，而变形方式一般又与冲压成形工艺之间存在着某种对应关系。图 9.9-40 所示，是从变形语义角度对钣金零件特征进行分类的结果。

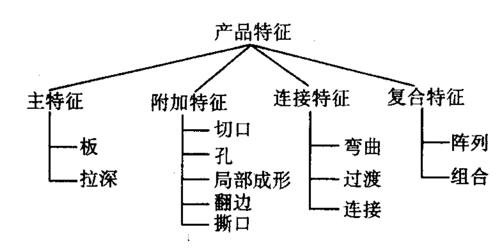


图 9.9-40　钣金零件的特征分类

1）主特征。主特征是用于构造钣金零件总体形状的一类特征，表达了钣金零件的主要形状，包括平板和成形面。其中，平板表示零件上的平板形状，成形面表示零件上由拉深变形所产生的形状。

2）附加特征。附加特征是用于修改零件局部形状的一类特征，表达了钣金零件的局部形状，是对零件主要形状的补充，如孔、凸起（包括筋、压印等局部成形）、切口、翻边和卷圆等。它们位于或者附加在主特征之上。

3）连接特征。连接特征是用于将主特征和附加特征等特征连接在一起的一类特征，描述钣金零件各组成部分之间的连接关系，即描述主特征间以及主特征与附加特征间的连接关系，如弯曲连接和过渡连接等。

4）复合特征。复合特征是由一组简单特征按一定结构关系组合在一起所构成的特征。它分为两类，一类为一组相同特征以一定关系（如圆周均布或阵列布置）组合在一起所构成的特征，另一类则为不同的特征按一定关系组合在一起所构成的特征。合理地使用复合特征可以更明确地表示零件的变形特点及其相关语义信息，且还可方便用户的操作，简化特征的描述。

(3) 钣金零件的单元特征模型

由于在后续的工艺设计过程中，需对每一个特征几何形状进行处理，为处理方便，将每一特征从几何上都看作一完整的几何实体，而将组成零件的每一个特征都被表达成一个完整的单元。每个特征单元（与某一特征类相对应）由其形状和变形语义描述，并通过面边关联构成钣金零件完整的特征模型，从而可避免复杂的特征几何运算，且使后续工艺设计更加方便。图 9.9-41 所示为所采用的钣金零件单元特征模型。图中，FC_1，FC_2，FC_n 为单元特征，它们分别包含相应的特征语义和几何描述。FR 表示各单元特征间的关系，它包括相邻关系、父子关系等。任何钣金零件都是由多个单元特征按照一定的关系组合起来的，例如图 9.9-42a 所示的一组单元特征，按照一定的关系组合在一起即构成一完整的钣金零件，如图 9.9-42b 所示。

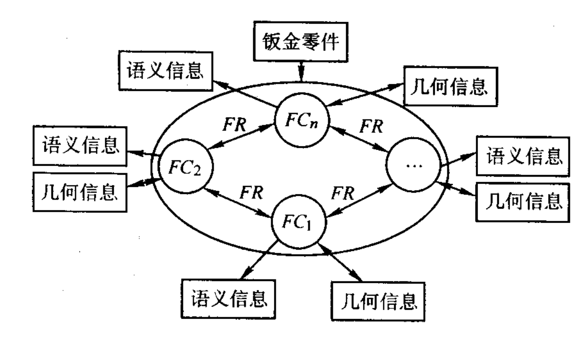


图 9.9-41　钣金零件单元特征模型

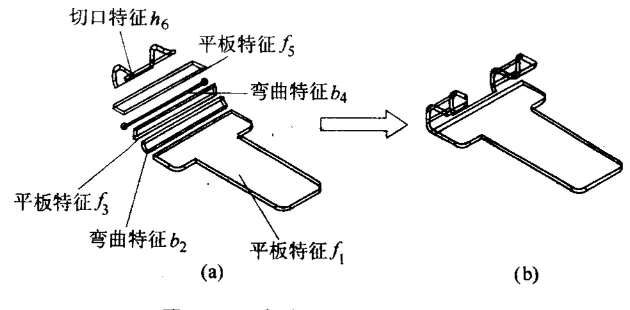


图 9.9-42　钣金零件单元特征组成

图 9.9-42a 中，f_1 和 b_2、b_2 和 f_3、f_3 和 b_4 以及 b_4 和 f_5



间的关系是相邻关系，b_2、f_3、b_4 以及 f_5 和 h_6 间的关系是父子关系。按照这种关系构成的钣金零件非常便于特征的展开和弯曲操作，同时各特征本身的语义信息又为后续的工艺设计提供了所需的工程语义信息。

(4) 冲压工艺特征

所谓工艺特征是指在钣金零件冲压工艺设计过程中所使用的特征，即各种冲压加工工艺，如弯曲成形、拉深成形、冲孔、切边、撕口等。它包含有关加工工艺方面的信息，同时也反映了板料变形的方式及其所能加工出的形状。为了将钣金零件单元特征模型中的特征转换成相应的工艺特征，需要对工艺特征进行分类。

根据钣金零件的变形特点和模具设计的要求，工艺特征被分为冲裁、弯曲、拉深、翻边和局部成形五类，如图 9.9-43 所示。冲裁类包括冲废料、冲孔和切断等；弯曲类包括 U 形弯曲、阶梯形弯曲和单角弯曲等；拉深类包括圆筒形拉深、方盒形拉深和腰圆形拉深等；局部成形类包括撕口、局部成形和搭桥等。

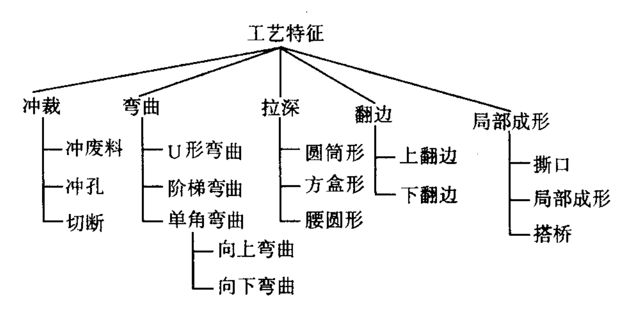


图 9.9-43　冲压工艺特征分类

有时可将上述工艺特征组合在一起构成复合工艺特征，如撕弯工艺特征是由弯曲和撕口两种工艺特征组合在一起构成的。

7.2　基于特征的冲压工艺设计方法

7.2.1　毛坯展开

钣金零件的展开是指将所有弯曲特征的柱面形状展成平面形状，并将其他相关联特征变换到相应位置，从而获得毛坯形状的过程。弯曲展开过程是金属塑性变形的逆过程，其展开长度一般采用经验公式或查表法进行计算。

$$L = (r + kt)\alpha\pi/180°$$

式中，L 为展开长度；r 为弯曲内侧半径；k 为中性层系数，通常可查表获得；α 为弯曲角；t 为板厚。

由于不同的材料、不同的弯曲成形方式，展开长度的计算公式或相关系数会有所不同，因此通常系统允许设计人员根据需要选择或定义不同的计算公式和相关系数。

下面说明弯曲展开的实现过程。如图 9.9-44 中所示，与弯曲特征（B_1）相邻的平面特征（F_2）在 B_1 展平后，它将变换到图 c 所示的位置。这一位置可通过以下变换过程获得。

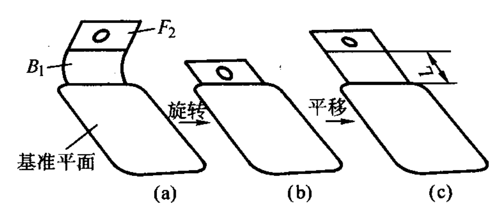


图 9.9-44　弯曲展开的变换过程

首先将 F_2 绕 B_1 柱面的轴心线旋转，此时该平面形状被变换到图 b 所示位置，由于弯曲柱面展平后其长度为 L，因此，需将平面特征沿柱面展平方向平移 L。将这两个变换过程级联在一起即构成了弯曲特征展平时与其关联特征的变换矩阵。弯曲特征 B_1 则可通过直接将其轮廓展为平面形状获得。

针对每一弯曲特征作上述处理后，即可获得完整的钣金零件展开图。以下是基于钣金零件单元特征模型所建立的钣金零件展开算法。

1）选择一平板特征作为固定面。

2）从该特征出发，找出所有与该特征相邻接的弯曲特征，并存入队列 B _ list 中。

3）若 B _ list 为空，则表示弯曲特征全部展平，结束；否则，从该队列中取出一弯曲特征，按照该特征的有关参数计算其对应的弯曲展开长度及弯曲展开变换矩阵 T。

4）建立该弯曲特征展平后的平面形状。

5）将与该弯曲特征相关联的其他特征按 T 变换到相应的位置。

6）找出与该弯曲特征相邻的另一特征 F，若 F 为弯曲特征时，将其加入队列 B _ list 中；若为板特征，则找出与该板特征相邻接的其他弯曲特征，并将它们存入队列 B _ list 中，转 3)。

7.2.2　毛坯排样

在级进模设计过程中，毛坯排样的作用是确定步距、料宽、零件的方向及排样方式（单排、双排）等。一般地，在级进模设计过程中，很少考虑以材料利用率为优化目标的毛坯排样方式。这是由于毛坯排样是条料排样的基础，需考虑成形的方便性、模具设计和制造的简易性等。单纯以材料利用率为目标函数的优化排样结果，经常会造成不易成形、模具结构复杂等问题。因此，在级进模的设计过程中，其毛坯排样一般采用交互方式进行设计。

在交互式毛坯排样过程中，仅需对毛坯形状进行复制、旋转、平移等操作即可。通过旋转、平移，可改变毛坯的方向、排样步距和条料宽度，而通过复制，可实现单排或双排的处理。图 9.9-45 所示为毛坯排样的流程图。

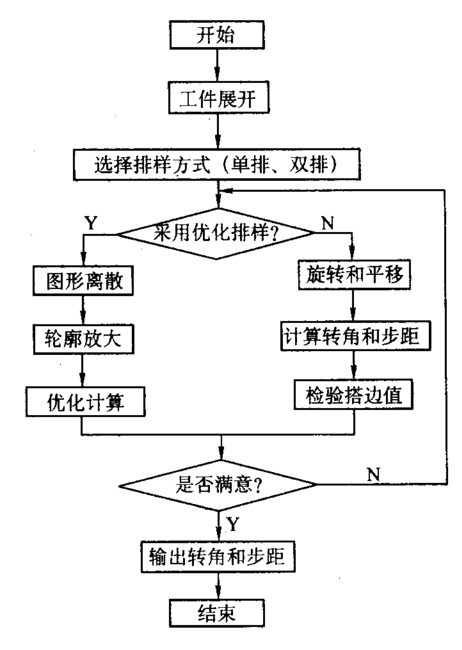


图 9.9-45　毛坯排样流程图

7.2.3　废料设计

废料设计是级进模工艺设计中的难点，影响因素很多，即使有丰富经验的设计人员也要反复推敲和修改，因而很难采用计算机自动设计，所以系统采用交互方式设计废料。

级进模设计中的废料可分为整体废料和孔废料。整体废料由毛坯轮廓映射而来，孔废料由孔特征或切口特征映射而来。废料设计包括整体废料设计、废料分割、废料合并、废料搭边设计、废料过切设计和自定义废料设计等功能。整体废料设计用于剥离出孔废料和整体废料的形状；废料分割用于将形状复杂的废料分解为形状相对简单的废料；废料合并用于将两块废料合并为一块废料；废料搭边设计用于设计相邻的两块废料之间的相互搭接；废料切角的目的是为了清除冲裁毛刺。用户自定义废料用于设计辅助废料工艺，如导正孔工艺和侧刃工艺等。孔废料和整体废料与产品毛坯及毛坯排样结果关联，而废料搭边与废料切角通过约束表达式与废料轮廓关联。废料的设计流程如图 9.9-46 所示。在完成毛坯排样后，首先进行整体废料设计，再根据需要将整体废料分解为简单的易加工的废料，经过搭边和过切设计，最后布置到条料上。

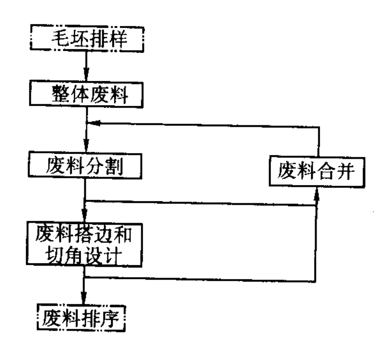


图 9.9-46　废料设计流程图

7.2.4　条料排样

条料排样主要有两个任务：一是将除废料以外的所有板金设计特征映射为冲压工艺特征；二是将所有冲压工艺特征在条料上排序。由于钣金零件特征模型中的每一个特征与这些分解出的形状相对应，因此，采用基于特征的条料排样设计时，仅需选择要成形的特征和确定其成形的工位。其他相关几何处理工作，则可由系统自动完成。

(1) 钣金零件特征到冲压工艺特征的映射

由于钣金零件特征模型中各单元特征是从变形语义角度进行分类的，它与加工方法之间存在着对应关系。然而，由于冲压加工的特殊性，有些单元特征可直接映射成相应的工艺特征，而有些单元特征则不能直接映射成相应的工艺特征。例如，当将一弯曲角为45°的弯曲特征映射成弯曲工艺特征时，由于弯曲回弹的影响，此时弯曲的弯曲角则可能为44°。又如，由于平板特征通常是采用冲废料的方式获得的，此时它将被映射成一组相应的切口特征。单元特征到工艺特征的映射除与单元特征本身的形状密切相关外，还与钣金零件的材料、精度要求、条料强度等密切相关。因此，在冲压工艺设计过程中，采用图 9.9-47 所示的单元特征到工艺特征的映射模式。

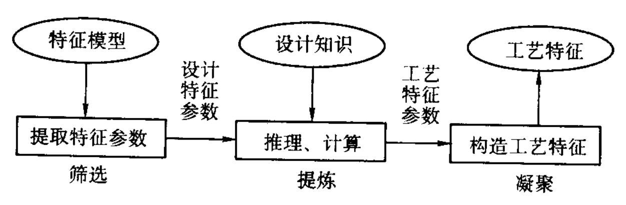


图 9.9-47　冲压工艺特征映射过程

筛选过程是从单元特征模型中提取相关单元特征，提炼过程则按照一定的规则要求从筛选出的信息中提炼出相应的特征参数和几何要素，最后的凝聚过程则是将提炼出的特征参数和几何要素根据冲压工艺设计规则构造成对应的冲压工艺特征。这一映射过程可用函数表示如下：

$$M:\ R_p \rightarrow R_s$$

式中，M 为特征空间的映射函数；R_p 为原像特征空间，即单元特征模型；R_s 为像特征空间，即冲压成形工艺模型。

上式可进一步描述成以下函数复合过程：

$$R_s = M_a\ (M_s M_f\ (R_p))$$

其中

筛选过程：M_f：$R_p \rightarrow F_p$；

提炼过程：M_s：$F_p \rightarrow F_s$；

凝聚过程：M_a：$F_s \rightarrow R_s$。

式中，F_p 为筛选出的有关信息；F_s 为提炼出来的冲压工艺特征信息；M_f、M_s、M_a 为分别为筛选函数、提炼函数和凝聚函数。

例如，在进行弯曲成形工艺设计时，首先从单元特征模型中提取出相关的弯曲特征单元，并提取出相应的特征参数（弯曲半径、弯曲角及其几何形状）（筛选过程），然后根据一组规则和方法计算其弯曲回弹角及弯曲成形参数（提炼过程），并由此构造出弯曲成形工艺特征（凝聚过程）。

经过上述映射处理生成的工艺特征就是级进模条料排样中的一个工步。

(2) 条料排样模块的功能

条料排样包括条料初始化、工步布置、移动工步、删除工步、插入空工步和条料仿真等功能。条料初始化用于生成具有一定长度的条料形状；工步布置用于将映射得到的冲压工艺特征布置到条料上；移动工步用于调整冲压工艺特征在条料上的位置；删除工步用于将布置在条料上的冲压工艺特征从条料上移走；插入空工步用于在已排序的工步间插入一个空工位；条料仿真用于生成条料的真实形状，以检查冲压工艺设计是否合理。

8　级进模结构与零件 CAD

在进行模具结构及零件设计时，首先根据条料排样图确定总体结构，即绘制总装图，然后以此为基础，详细设计其的组成零件，绘制零件图。这一设计过程是一自上向下的设计过程。模具组成零件的形状除受成形工艺、形状约束外，还受其在模具中所处的位置及与其他零件的关系所约束。只有将总装结构确定了，才能获得零件的相关约束，进行零件的设计。为此，在开发级进模 CAD 系统时，应采用如下的自上向下的设计模式实现级进模结构及零件的设计。

首先，根据条料排样图确定模具的总体结构，然后直接在该总体结构下设计模具零件，零件设计和装配设计是同时进行的。这样，在设计某一零件时，其相关零件的形状变化可被自动处理，如产生相应的孔、槽等，从而可保证设计结果的一致性。当零件设计完后，可将装配结构中的零件输出，产生零件工程图，标注相关尺寸和技术要求等。

8.1　级进模结构的装配模型

为了在级进模结构及零件设计过程中，实现上述的自上向下的设计模式，需建立一装配模型来描述零件间的装配关系。级进模零件之间是一种层次关系，如图 9.9-48 所示。但这种层次关系只能描述零件间的对应关系，还不能完整地描述零件间复杂的约束关系。如凸模通常穿过凸模固定板、卸料板等，它将影响这些板件的形状（产生相应的孔），以及凸模与凹模之间形状的关联性等。但层次模型具有操作简单，易于维护等特性。为此，在层次模型基础上，通过增加零件间的约束虚链来描述零件间的复杂关系，从而构成了一

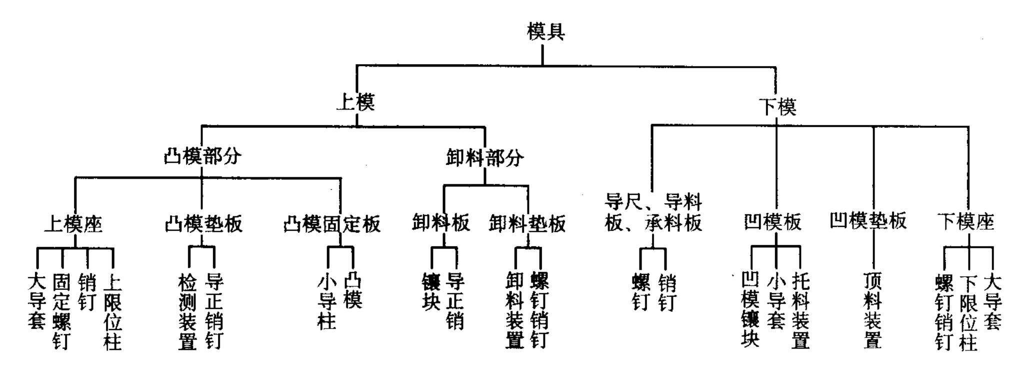


图 9.9-48　级进模的层次结构

约束关系树模型，如图 9.9-49 所示。图中结点表示零件或子装配，结点间的箭头表示结点之间的父子关系，结点之间的连线表示结点之间存在的约束关系，这种模型有效地描述了模具零件间的约束关系。

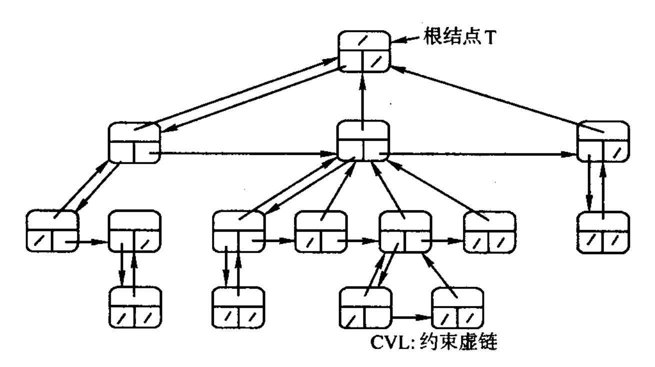


图 9.9-49　约束关系树模型

8.2　总体结构及零件设计

从级进模的结构型式上看，除模板外，它的组成零件是分布在两种不同的区域。如图 9.9-50 所示，在工作区部分的零部件主要包括凸模、凹模镶拼块、侧刃、定位销等，它们与具体冲压成形工艺和形状相关；而在工作区之外（称为非工作区）则主要是一些标准件，如导柱、导套、固定螺钉、销钉等。模板作为一类特殊的零件，它们构成了级进模的总体框架结构，作为安装其他相关零件的基础。因此，模具总体结构及零件的设计可分为工作区内零件的交互设计和非工作区内零件及模架的标准化设计。

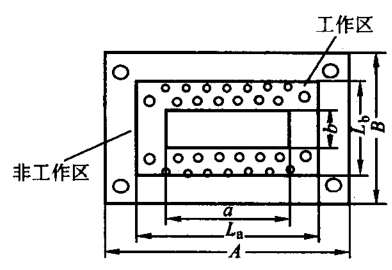


图 9.9-50　级进模零件的组成特点

8.2.1　模架设计

采用自上向下的设计方法需首先建立进行总装设计的约束要求。这些约束要求除条料上的各成形工步和形状外，就是级进模的模架结构。因此，在进行总装结构设计时，需首先确定模架结构。通常模架是一标准结构，可预先保存在模架库中，其大小是受条料的相关尺寸影响的。因此，确定模架也就是根据条料的相关尺寸从模架库中选择一合适的模架模型，然后实例化后，将其插入相应的位置。模架设计的具体过程为：

1）从当前模架库中选择一种模架类型；
2）根据设计需要从该类型中选择相应的模架子类型；
3）确定模具的工作区域，交互在图形区域上选取；
4）修改模架参数，加入标准模架；
5）根据条料的形状，调整模架的位置。

8.2.2　零件设计

模具零件包括标准件和工作件（如凸模、凹模等）。设计标准件时，可从标准件库中选择相应的零件，经实例化处理后插入相应位置即可。工作件的设计与具体板金零件形状，亦即对应的成形工艺形状相关，需采用交互设计方法进行设计。工件零件设计包括凸模类和嵌拼类零件。

（1）嵌拼块设计

嵌拼块设计包括凹模嵌拼块设计和卸料板嵌拼块设计。设计时虽然有一些定性的原则可循，但实际运用起来非常灵活，不同的设计者往往得到不同的设计结果，因此嵌拼块设计是级进模结构设计的难点之一，而且凹模嵌拼块是级进模中最重要的工作部件，设计的好坏直接影响到级进模在实际工作中的使用，所以嵌拼块设计也是级进模结构设计的关键。

针对多工位级进模嵌拼块设计的特点，其设计操作应以交互式为主，提供各种方便的设计工具，以充分发挥用户的设计经验。以图 9.9-51 的凹模嵌拼块为例，实际设计时，首先应在条料排样图的基础上进行刃口尺寸计算，然后用直线、圆弧等基本线型交互式完成各组嵌拼块的划分。由造型服务程序 Model 函数逐个拾取这组嵌拼块的封闭轮廓，并调用实体造型系统中的相应的命令生成各嵌拼块的基本型体。同时，生成凹模板上相应孔的负型体，以便以后在模板上生成孔型。对于冲裁工序，还应当构造出漏料孔，并对嵌拼块各基本型体运用布尔运算逐个减去漏料孔。对于非冲裁工序，如弯曲、局部成形等，可能还要通过交互式的办法构造嵌拼块上各种特殊的局部形状。最后，将构造好的各组嵌拼块以双层双向链表数据结构保存。图 9.9-52 为凹模嵌拼块设计过程程序框图。

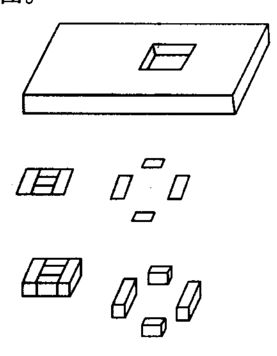


图 9.9-51　凹模嵌拼块设计



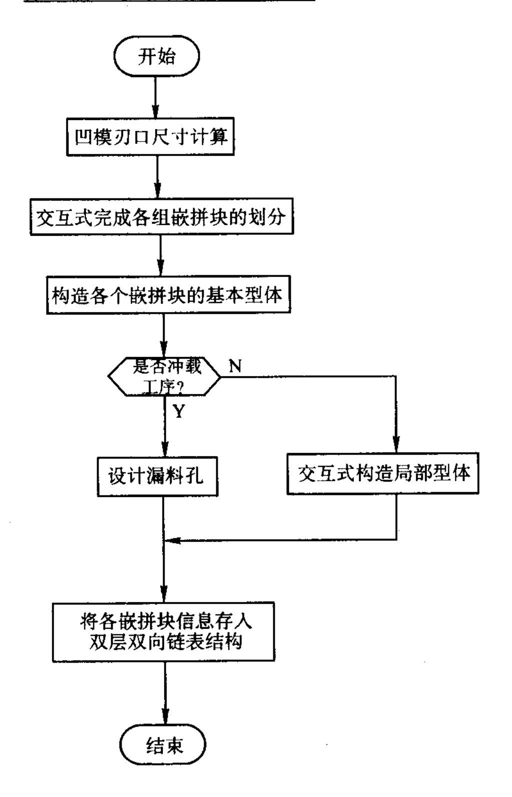


图 9.9-52 凹模嵌拼块设计过程程序框图

(2) 凸模设计

与嵌拼块的设计方法类似，凸模的设计也大量地使用交互式设计，以充分发挥模具设计人员的知识和经验，图 9.9-53 为凸模设计过程程序框图。首先，应由条料排样图得到凸模工作部分的截面轮廓，并进行凸模刃口尺寸计算。在此基础上构造凸模工作部分与非工作部分的基本型体，对于弯曲、成形等非冲裁凸模还要交互式地构造某些局部型体。若凸模安装在固定板上，一般使用压板紧固，如安装在卸料板上，一般使用螺钉直接紧固。最后，将各个凸模组件存入双层双向链表。

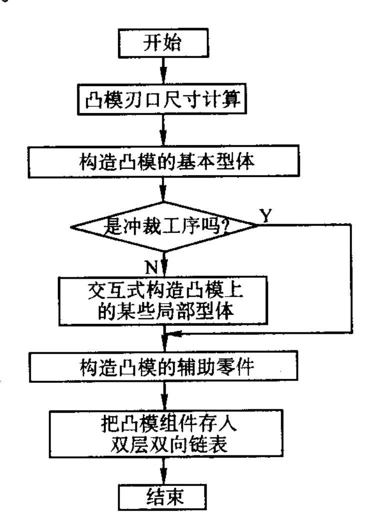


图 9.9-53 凸模设计过程程序框图

9 覆盖件模具 CAD 系统的结构

覆盖件模具是生产汽车覆盖件的重要工艺装备，对生产高质量的车身起着决定性的作用。覆盖件模具具有结构尺寸大、型面形状复杂、尺寸精度和表面粗糙度要求高、要求使用寿命长、单件生产和设计制造周期长等特点。传统的覆盖件模具设计与制造过程包括：工艺计划、主模型制造、冲模设计、工艺模型制造、冲模加工、研配及调试、检测等。传统的模具设计制造方式的特点有：覆盖件模具的空间基准是主模型；基于主模型和二维车身零件线图进行模具设计；模具设计凭经验进行；工艺模型的制造质量决定着整套模具的质量；仿形加工是模具型面加工的主要方式，模具的研配和调试工作量很大。覆盖件模具的传统设计制造过程存在的主要问题表现在：

1）设计制造周期长；
2）信息共享程度低；
3）凭经验设计，结果难以预测；
4）设计效率低。

为解决上述问题，在覆盖件模具设计与制造中采用 CAD/CAM 技术是有效的途径。采用 CAD/CAM 技术时，通过建立车身外表面数学模型，取代油泥模型。模具设计时，在车身外表面数学模型的基础上添加工艺补充部分后完成模面设计。模具采用数控加工，并共享车身设计和模具设计数据库中的信息。通过信息的共享与集成，达到提高覆盖件模具设计与制造质量、缩短设计制造周期的目的。

覆盖件模具 CAD 系统用于完成覆盖件冲压工艺与模具结构设计。根据汽车覆盖件模具的设计特点，考虑与模具 CAM 系统集成要求，覆盖件模具 CAD 系统可分冲压工艺设计、成形分析与模拟、模具结构设计三大功能模块。系统的结构如图 9.9-54 所示。

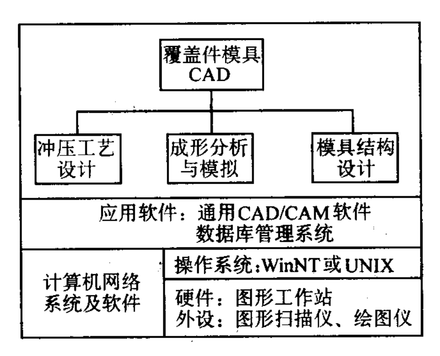


图 9.9-54 覆盖件模具 CAD 系统的结构

9.1 冲压工艺设计

冲压工艺设计是模具结构设计的基础，它不仅决定了冲压生产工艺过程，而且直接决定了模具结构的复杂程度，是覆盖件模具设计中的重点和难点。其主要工作是完成和数控加工有关的模具型面的三维设计，为模具结构设计提供各种特征线，包括修边线、翻边线、凹模口线和典型截面线。冲压工艺设计模块由四个部分组成，即工艺预处理、冲压方向确定、工艺补充部分设计和特征曲线设计。系统输入的零件模型，包括了孔洞和翻边等形状特征，这些形状是在拉延工序后形成的，因此模具型面设计时要从零件上去除这些特征形状。另外，有些零件需要采用成双冲压工艺，设计前要将两个对称件组合成一个零件，工艺预处理完成上述处理工作。冲压方向确定模块采用交互和自动两种方式确定冲压方向，并提供等高线等分析方法确定冲压方向的可行性。工艺补充部分设计包括压料面、拉延筋和拉延台阶设计功能。特征曲线是指修边线和翻边线等。这些特征曲线是模具工程计划图的重要内容，也是后续模具结构设计的重要依据。

9.2 模具结构设计

在一般模具厂，除模具型面采用数控加工以外，模具零



件仍有一部分采用常规方式加工。模具结构设计模块完成模具图的二维设计，为常规加工车间和管理部门提供所需的模具图。模具结构设计软件应力求采用规范化、标准化的设计方法。通过对设计方法的总结达到规范化，并用程序实现规范化的设计，提高模具设计的效率。它主要包括三个方面的内容：一是建立标准件图库，包括模板、模架设计、卸料装置设计、各种辅助装置设计等，在模具设计中可以调用这些标准件。二是设计资料库的建立与查询，包括明细表的自动生成、明细表常用汉字字库、常用符号库、压力机库和通用参数化部件库，以及设计资料查询、压力机规格查询、公差查询等内容。三是典型结构的设计软件，如拉延模的凸模设计、凹模设计、压料圈设计和总图生成等。从长远的观点来讲，模具图的计算机管理是必不可少的，它分为两部分内容，一是建立已有图样（蓝图或底图）的图形扫描输入系统，二是建立图库管理系统。

10 覆盖件冲压工艺 CAPP

10.1 冲压工艺 CAPP 系统的总体结构

图 9.9-55 所示为覆盖件冲压工艺 CAPP 系统的框架结构。

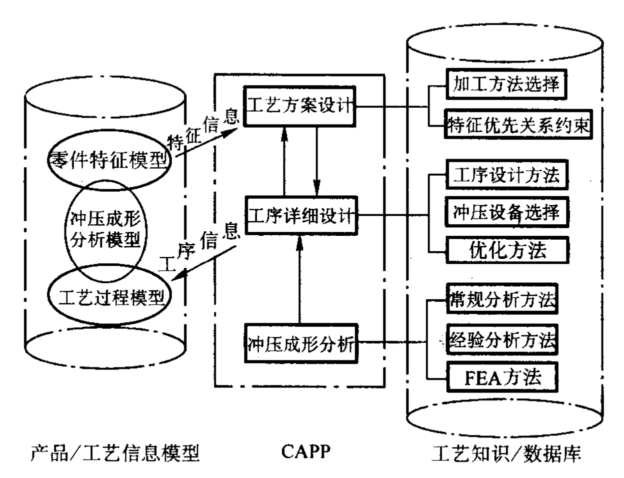


图 9.9-55 覆盖件冲压工艺设计系统的框架结构

(1) 产品/工艺全局信息模型

产品/工艺全局信息模型是工艺设计过程中信息分析、处理和交换的基础和平台，包括三个相互关联的子模型：零件特征模型、工艺过程模型和冲压成形分析模型。

零件特征模型用以表达产品信息，包括特征和几何两个层次的信息。特征层次的信息提供工艺设计和冲压成形分析所需的有关信息。几何层次的信息则支持模具结构设计和 NC 程序的生成。

工艺过程模型用以记录和表达工艺设计的推理过程和结果。

冲压成形分析模型则以零件特征模型和工艺过程模型为分析对象，以计算和几何推理为分析手段，从特征和零件两个层次上进行冲压成形分析。

上述各子模型之间既相互独立，又相互关联，因此零件建模、工艺设计和冲压成形分析可以分别进行，但同时又保证了模型之间的一致性。

(2) 工艺设计方法

覆盖件的工艺设计分两步进行：工艺方案设计和工序详细设计。工艺方案设计根据建立的零件特征模型，分析零件的工艺性，确定冲制零件所需采用的工序。通过推理判断，对工序进行合理组合，并安排各工序的顺序，从而产生工艺方案。工序详细设计完成工艺方案中各工序的详细设计。在此过程中，有可能要对工艺方案进行局部修改和调整，也可能会产生新的工序，如冲孔工序等。

覆盖件的冲压成形分析方法包括常规分析法、经验分析法和有限元方法。常规分析法是一些通用的判断规则和方法，如冲孔时检查孔径大小、孔间距等，弯曲时要考虑弯曲半径的限制等。经验分析法是以生产实践中的一些经验数据为依据，通过归纳总结得出的分析方法。有限元方法，是以金属塑性成形理论为指导，采用有限元分析方法对板料成形过程进行模拟，分析其成形性能。

(3) 工艺知识/数据库

工艺知识/数据库是工艺设计推理的基础，包括工艺设计各个阶段中进行推理所需的工艺知识和相关的数据（冲压设备、材料、工艺装备等生产环境的数据）。

根据上述结构，车身覆盖件冲压工艺 CAPP 系统包括了三个有机的组成部分：冲压工艺数据管理、工艺设计和工序件的详细设计。覆盖件的冲压工艺数据管理系统的主要功能是实现对现有工艺的有效管理，并可以交互地完成工艺设计。利用工艺数据库中的现有工艺，可实现基于成组技术的检索式的汽车覆盖件冲压工艺设计。工序件的详细设计是冲压工艺设计的重要内容之一，是模具型面设计的主要依据，采用 CAD 方法进行工序件设计是提高设计效率和质量的有效途径。

10.2 覆盖件冲压工艺的数据库管理系统

(1) 系统的结构

冲压工艺数据库管理系统结构如图 9.9-56 所示。其中，工艺设计模块对新零件进行交互的工艺设计；数据管理模块在 DBMS（数据库管理系统）环境的支撑下管理冲压工艺数据库中的数据；输出模块产生报表格式的工艺文件。

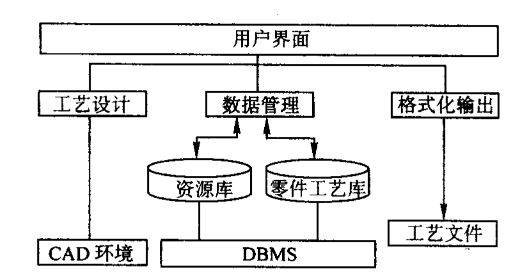


图 9.9-56 冲压工艺数据库管理系统框架

(2) 需求分析

通过对汽车冲压件生产的调查分析，冲压工艺 CAPP 所要产生的主要文档如表 9.9-2 所示。在进行数据库设计时，首要任务就是建立每一个文档的数据元素说明，称为数据元素表，其内容包括所属文档数据标识符、数据元素名、含义、类型、长度等。表 9.9-3 给出了冲压工艺卡的数据元素表。

表 9.9-2 覆盖件冲压工艺数据库中的文档

文档号	文档名	用途	出处	保密级
D-1	冲压工艺卡	指导冲压生产	工艺科	无
D-2	剪切下料卡	指导剪切下料	工艺科	无
D-3	冲模安装卡	指导冲模安装	工艺科	无
D-4	检查基准书	检验产品合格性	工艺科	无
D-5	设备表	保存设备参数	设备处	无
D-6	材料性能表	保存材料性能参数	材料处	无
…	…	…	…	…

表 9.9-3 冲压工艺数据元素

数据元素名	含义	类型	来源	完整性限制
零件号	惟一识别零件的标识码	C25	输入	与设计给定的零件号一致
零件名称	零件名称	C30	输入	与给定的零件名称一致
更改标记	冲压工艺卡表头的更改标记	C16	输入	改动工艺方案时需此值
车间名	加工零件的车间	C10	输入	包含在车间名表中
工艺路线	加工零件的工艺路线	C20	输入	
材料牌号	该零件的材料	C20	输入	包含在材料表中
材料规格	料厚×料宽×料长	C20	换算	
材料重量	材料重量	F8.3	输入	大于0
零件净重	零件净重	F8.3	输入	大于0
毛坯尺寸	毛坯宽×毛坯长	C20	换算	
消耗定额	材料消耗定额	F8.4	计算	大于0
利用率	材料利用率	F4.1	计算	大于0
工艺附图	冲压工艺卡工艺附图	G	绘制	
工序号	工艺卡明细的工序号栏	C3	输入	
工序名称及内容	工艺卡明细的工序内容栏	M	输入	
工序草图	工艺卡明细的工序草图栏	G	绘制	
设备名称及型号	工艺卡明细的设备名称栏	M	选择	包含在设备表中
工装量具号	工艺卡明细的工装量具栏（一）	C16	输入	
工装名称及尺寸	工艺卡明细的工装量具栏（二）	M	输入	
工时定额	工艺卡明细的工时定额栏	F8.3	输入	大于0
操作人数	工艺卡明细的操作人数栏	I	输入	大于0
…	…	…	…	…

（3）数据库系统的概念设计

对覆盖件冲压工艺数据库进行概念设计的目的是为了标识出系统数据流中的实体、实体的属性、实体间的联系，最终建立一种合适的语义数据模型。

概念设计的内容包括：确定实体集及其属性、给出系统的实体－联系矩阵、根据实体－联系矩阵用E-R模型给出每对有联系的实体集的局部视图、进行视图合并生成全局概念模型。

在需求分析阶段得到的文档表和数据元素表可以作为确定实体集及其属性的输入源。因为文档表是根据需求分析阶段得到的数据流图转换而成的用户视图，而每一文档的数据元素表可以称为文档的属性。

标识出实体集及其属性后，可以着手标识出实体成员之间的联系，为局部视图定义作准备。根据用户视图语义，可得到如表9.9-4所示的覆盖件冲压工艺数据库的实体－联系矩阵，表中打“×”号的表示两个实体之间不存在联系。

表 9.9-4 覆盖件冲压工艺数据库实体－联系矩阵

		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15
覆盖件零件	E1	×							×							
冲压工艺卡表头	E2		×	×	×	×		×	×	×	×	×		×		
剪切下料卡	E3		×	×	×	×	×	×	×			×		×		
冲模安装卡	E4		×	×	×	×						×		×	×	×
检查基准书	E5		×	×	×	×		×	×	×	×			×	×	×
冲压工序	E6			×			×					×		×	×	×
冲模	E7		×	×		×		×				×		×	×	×
冲模安装用具	E8	×	×	×		×	×		×			×		×	×	×
双动压力机	E9		×			×				×	×	×		×	×	×
单动压力机	E10		×			×				×	×	×		×	×	×
检验夹具	E11		×	×	×		×	×	×	×	×	×		×	×	×
车间	E12												×			
车型	E13		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		×	×	×
材料	E14				×	×	×	×	×	×	×	×		×	×	
材料规格	E15				×	×	×	×	×	×	×	×		×		×



对于表9.9-4所示的实体-联系矩阵，需要用一种语义数据模型来表示，E-R模型是当前最常用的数据库系统分析与建模方法。利用E-R方法，可以描绘出表9.9-4中的每一对有联系实体的E-R局部视图。

E-R模型使用了三种模型结构元素：实体、联系、属性。用E-R方法进行数据建模的过程一般是先标识实体，再标识实体间的联系，最后加上属性。图9.9-57a和图9.9-57b分别表示零件和工艺卡、零件和剪切卡关系的E-R视图，它们均为1:1联系。图9.9-58a和图9.9-58b分别表示零件和车间、零件和车型关系的E-R视图，前者为M:1联系，后者为M:N联系。联系的两边的数字代表实体集中参加联系的实体的个数。

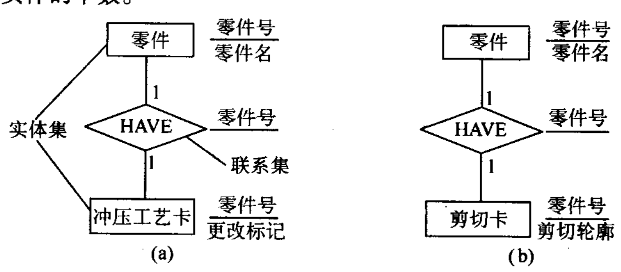


图9.9-57　零件和工艺卡、剪切卡的联系E-R视图

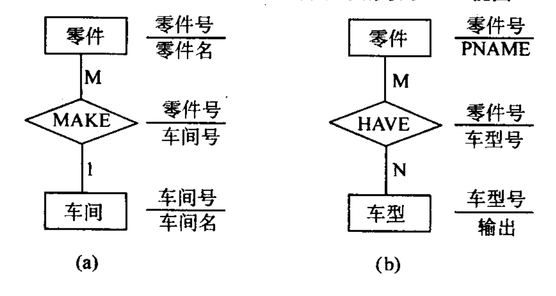


图9.9-58　零件和车间、车型的联系E-R视图

覆盖件冲压工艺数据库概念设计的最后一步，是对局部视图进行视图合并，生成整体的E-R图，即全局视图。这里要求消除冗余，使得在满足系统要求的前提下，尽量减少实体和联系的数量。

按照上述原则，图9.9-57a和图9.9-57b中的工艺卡实体和剪切卡实体都是零件的一部分，可以将其作为零件的属性合并入零件实体中，以减少实体数量。这一过程称为聚集合并。图9.9-58合并后，所得的E-R视图如图9.9-59所示。

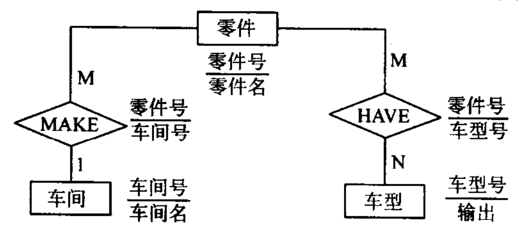


图9.9-59　视图合并示例

对每一个局部视图进行类似的合并，便可得出如图9.9-60所示的覆盖件冲压工艺数据库全局视图。

概念设计的目的是输出DBMS可识别的逻辑模型。覆盖件冲压工艺数据库常采用关系型DBMS，其支持的逻辑模型为关系模型。利用关系的规范化可得到有效的逻辑数据结构，故需将语义概念模型转换到关系模型。通常每一实体和联系转换成一个关系模式，其属性与标识符成为相应关系的属性和关键字。对联系，需统一从联系是1:1，1:M，或N:M来分别考虑，M和N表示多个实体。若联系是1:1的，则将该联系的属性（往往就是两个相联关系的关键字）并入两个相联关系的任一个，从而消去了联系的显式存在，需要时甚至可将两个相联的关系合并成一个。若为1:M联系，则将联系的属性并入代表M一边的对象集的关系中。若为N:M联系，则将其单独转换成一个关系。图9.9-61是由图9.9-60的语义模型转换的关系模型的功能视图。

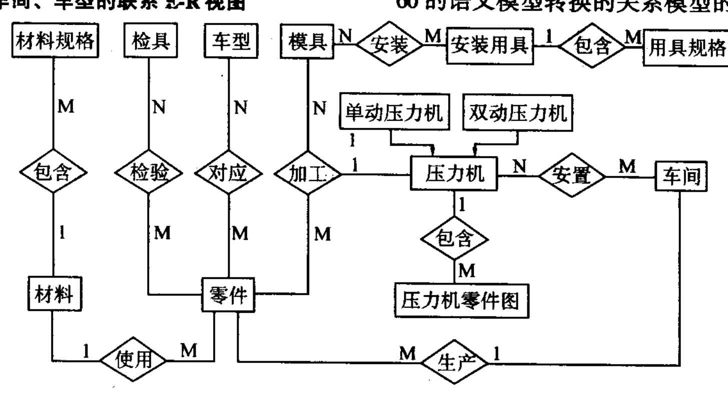


图9.9-60　冲压工艺数据库的全局视图

（4）程序设计

在覆盖件冲压工艺数据库的结构设计基础上，可进行数据库的应用程序设计。现在，一般的DBMS系统都提供了应用编程语言，包含了丰富的命令和函数，其语法结构类似于C、PASCAL等高级语言。利用其菜单生成器、表单生成器等开发工具可完成用户界面的编制。

覆盖件冲压工艺数据库管理系统提供的功能主要如下。

1）数据维护功能。包括数据输入、修改、删除、备份等。

2）查询功能。可方便地查询零件、冲模、压力机等各种信息。

3）统计计算功能。计算零件总工时、设备负荷等。

4）报表生成功能。可生成冲压工艺卡、剪切下料卡、冲模安装卡、检查基准书等工艺信息和冲模清单、检具清单等各类清单。

5）数据安全保护。通过提供用户口令、给使用者授权等方式保证数据的安全性。

10.3　基于成组技术的检索式工艺设计

覆盖件的冲压工艺数据管理系统的主要功能是实现对现有工艺的有效管理，并可以利用已有的工艺交互地完成工艺设计，但是其设计过程完全依赖于设计者的个人经验，不能提供相关的决策支持手段，难以保证设计质量。因此，有必要实现基于成组技术的检索式汽车覆盖件冲压工艺设计。检索式工艺设计事先把现行的零件加工工艺规程按零件图号或零件的成组编码号存储在计算机中，在编制新零件的工艺规程时，先按图号或成组编码号检索出存储的零件工艺规程，可直接调出使用，或稍加修改后使用。当检索不到可用的工

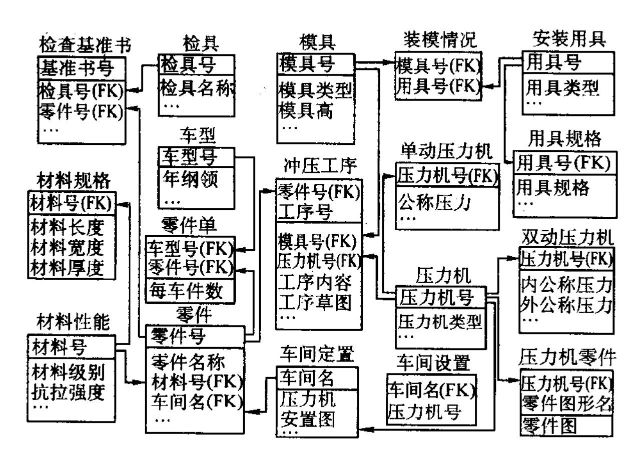


图 9.9-61　冲压工艺数据库关系模型的功能视图

艺规程时，则必须另行编制，并输入计算机内存储起来。检索式工艺设计的原理如图 9.9-62 所示。

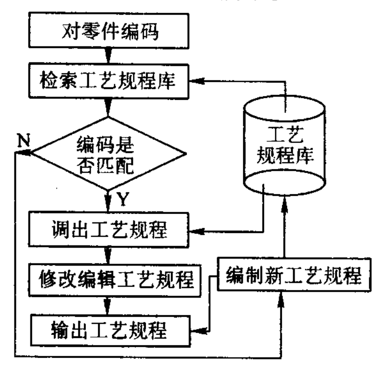


图 9.9-62　检索式工艺设计的原理

零件信息的输入和描述是 CAPP 系统开发的重要内容之一，是 CAPP 系统运行的基础和依据。影响覆盖件成形的因素众多，且大多数难以量化评价。如何抽取出决定覆盖件成形的关键信息是实现正确工艺设计的前提条件。因而 CAPP 系统首先要解决的问题是对覆盖件信息的输入和描述。常用的有零件分类编码描述法、形面要素描述法、图论描述法、专用描述语言法、面向零件特征要素法、CAD 模型法等。下面以基于形状特征的零件分类编码表示法为例，介绍覆盖件零件信息的描述方法。

经过对大量覆盖件冲压工艺资料的分析和归纳，可知影响覆盖件工艺规程的主要因素是零件形状特征、变形特征以及材料性能等。零件特征的分类如图 9.9-63 所示，这些特征也是编码的依据。以此为基础的编码方案如表 9.9-5 所示。

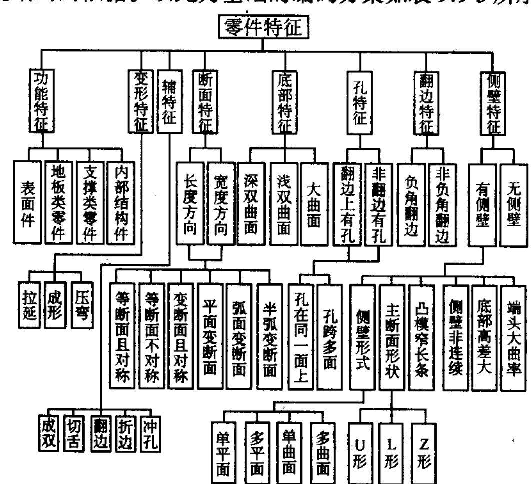


图 9.9-63　零件形状特征及变形类别

表 9.9-5　码位与特征的对应关系

码位	一	二	三~七	八	九	十	十一	十二
特征	功能特征	变形特征	辅特征	翻边特征	翻边上孔分布	非翻边上孔分布	侧壁特征	侧壁主断面
码位	十三	十四	十五	十六	十七	十八	十九	
特征	侧壁非连续	底部高差	凸模窄长条	端头大曲率	底部形状	长度方向断面特征	宽度方向断面特征	

成组工艺过程设计可采用两种基本的方法：复合零件法和复合路线法。

复合零件法又称主样件法或综合零件法，它是利用一种所谓的复合零件（主样件、综合零件）来设计成组工艺的方法。复合零件必须拥有同族零件的全部待加工的要素。因此，复合零件既可是零件族中实际存在的零件，也可是虚拟的零件。对于形状规则、型体对称的零件而言，采用复合零件法并不困难。然而，对形状极不规则的，很难形成复合零件。

复合路线法是先选取加工族中工艺路线最长的作为代表路线，再将代表路线与族内其他零件的工艺路线相比较。将其他零件有的而代表路线没有的工序——添入，即可得到该加工族的成组工艺。对成组工艺中的多余工序作相应的删除，便得到了族中各零件的代表工艺。

由于以上对覆盖件的分类采用的是几个主要特征的码位法，以致同族零件数目较多。为了保证成组工艺设计的准确性和合理性，在族内又采用了差异度比较法。在进行工艺设计时，优先采用族内零件差异度比较法，通过查找，按与所设计零件最相近的零件工艺来确定其工艺。为此，系统规定了差异度的最大值范围，若在差异度的最大值范围内没有找到相近的零件，再采用复合路线法进行冲压零件的成组工艺设计，调出该族零件的复合工艺规程作为参考工艺规程。

10.4　基于特征的冲压工序详细设计

10.4.1　覆盖件产品的分类描述方法

工序的详细设计中要对覆盖件零件的 CAD 模型进行操作，成组技术不可能完成这一任务，因此要采用基于特征的设计方法。这种方法首先要解决的问题是产品的信息描述问题。覆盖件产品定义模型如图 9.9-64 所示。

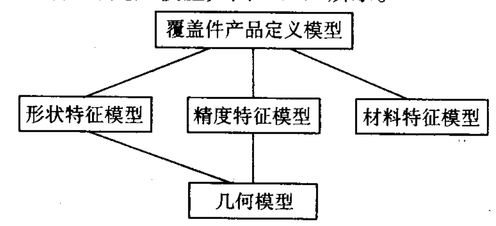


图 9.9-64　覆盖件产品定义模型

覆盖件产品定义模型是以几何模型为载体，由形状特征模型、精度特征模型、材料特征模型构成的一个有机整体。其中，形状特征模型是产品定义模型的核心。形状特征是精度特征和材料特征的载体，精度特征和材料特征可作为属性或约束附加在形状特征的组成要素上。

在实际的应用活动中，人们所感兴趣的形状要素是不同的。冲压工艺特征分类采用了模具设计人员所熟悉的工程语义，根据冲压工艺在覆盖件生产中的作用、应用范围及其对模具结构影响程度的不同，将其划分为工艺主特征和工艺辅



特征两大类，每类又分为若干子类。主特征指覆盖件的主要结构形状，也就是将车身划分成覆盖件时形成的型面，这部分形状是由拉延变形形成的形状。辅特征是对主特征的补充和修改。零件的冲压工艺特征分类层次结构如图9.9-65所示。

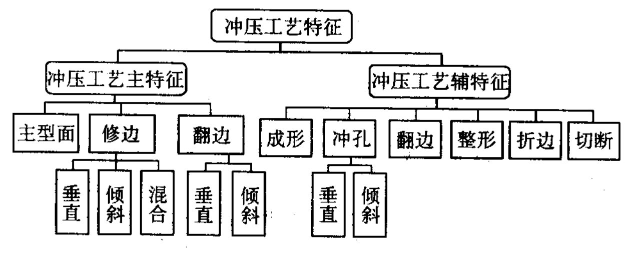


图9.9-65 覆盖件冲压工艺特征的分类

10.4.2 拉深工序件设计

拉深工序件的设计包括拉延方向的选择、工艺补充部分和压料面的生成以及拉深筋的布置等。

(1) 冲压方向的优化设计

汽车覆盖件冲压工艺设计中，冲压方向的选择为拉深工序件设计的第一步，也是关键的一步，冲压方向不但影响拉延中金属的流动和模具结构的设计，决定能否拉出合格的拉深件，而且还将直接影响到后续的所有工序。为此，应采用优化设计方法确定合理的冲压方向。

由于覆盖件为复杂的空间形状，处理三维问题往往比较困难，所以实际中工艺人员通常是全面考察整个零件后，截取若干个典型的截面，以这些截面形状为基础进行分析判断。因此，可以通过截取零件的典型截面，将复杂三维问题转化为二维问题，然后再将二维分析结果加以综合，以获得三维问题的解。所以，可以借鉴这种方法的优点，在此基础上建立冲压方向的优化模型。

冲压方向的优化问题，目标函数可表示为以转角 α 为变量的函数。对于每一个 α 值，可惟一地确定一个截面的位置。

为了考察凸模和板料之间初始接触点和接触面积的情况，采用图9.9-66所示的方法。将过截面图形最低点的水平线 $A—A$ 升高 δ 距离，构成接触线 $B—B$。截面图形与直线 $B—B$ 的相交情况，反映了拉深开始时板料和凸模的接触状况。δ 值的选取经反复试验，取为零件拉深深度的1/40较为合适。用截面图形与接触线 $B—B$ 的相交部分表示凸模与板料的接触部分，于是根据确定拉延方向的原则，可建立相应的优化目标函数。

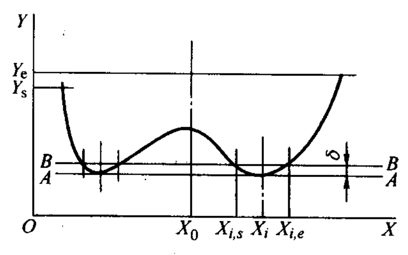


图9.9-66 覆盖件截面分析

1) 初始接触面积

$$f_1(\alpha) = \sum_{i=1}^{n}(X_{i,e} - X_{i,s})$$

式中，接触面积用相交部分的线段长度表示。

2) 初始接触点的分布均匀程度

$$f_2(\alpha) = (\sum_{i=1}^{n} X_i/n - X_0)^2$$

3) 初始接触点的分散

$$f_3(\alpha) = \max\{X_i\} - \min\{X_i\}$$

4) 进料阻力均匀程度

$$f_4(\alpha) = |Y_e - Y_s|$$

这里，进料阻力的均匀程度用两端的高度差来表征。

在上述表达式中，n 为相交部分的段数，$X_{i,s}$、$X_{i,e}$、X_i 分别为第 i 个相交部分的起点、终点和中点，X_0 为截面图形几何中心的 X 坐标，Y_s、Y_e 为截面图形的起点与终点的 Y 坐标。

冲压方向的优化问题为多目标优化问题。为了综合优化各个目标，可采用评价函数法，将多目标优化问题转化为单目标优化问题。根据确定冲压方向的基本准则，要求初始接触面积尽量大，凸模表面同时接触毛坯的点要多而分散，并尽可能分布均匀，拉深深度差别小，则评价函数 $U(\alpha)$ 可表示为

$$U(\alpha) = \sum_{i=1}^{4} \lambda_i U_i(\alpha)$$

式中，$U_1 = 1/f_1$，$U_2 = f_2$，$U_3 = 1/f_3$，$U_4 = f_4$；λ_i 为权系数。

权系数根据俄罗斯学者克雷若诺夫斯基的方法，取为

$$\lambda_i = 1/U_i^0$$

其中，$U_i^0 = \min\limits_{\alpha \in X} U_i(\alpha)$，即将各单目标最优值的倒数取为权系数；$X$ 为公共可行域。权系数的这种取法所形成的评价函数反映了各个单目标函数值离开各自最优值的程度。

采用评价函数法，将多目标优化问题转化为单目标优化问题，即对各目标取权系数，再加权求和。各个目标函数可表示为转角 α 的函数，在设计过程中惟一的约束条件是不得存在死角。由此决定了每个截面的可行域，进而可确定每个坐标轴的公共可行域。采用搜索法求出各个截面的最佳转角后，加权平均确定绕各坐标轴的转角，即求出冲压方向。优化确定冲压方向的程序流程如图9.9-67所示。

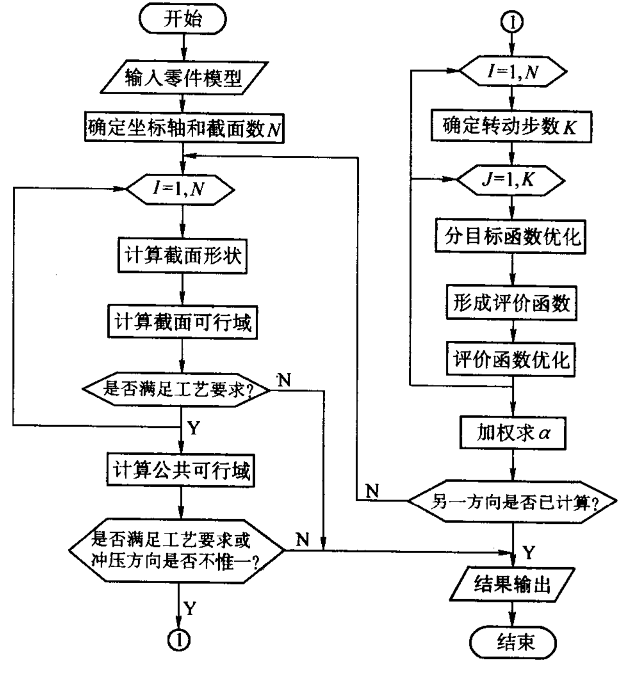


图9.9-67 冲压方向优化设计流程图

首先输入覆盖件零件模型，然后确定需要计算转角的坐标轴。沿该轴截取 N 个截面，计算每个截面的可行域，并判断其是否满足工艺要求，不满足则退出，同时给出提示信息。在计算完 N 个截面的可行域后，求它们的公共可行域，然后判断是否满足工艺要求，满足则继续执行。根据公共可

行域的域宽 β_L，确定求解的步数 K，将截面变换至公共可行域的起始位置，以 β_L/k 为转角开始优化计算，对各个分目标函数进行优化，形成评价函数，并对评价函数优化。随着截面形状的转动，以最优值替代当前值，最后可得到最优值所对应的转角 α_i。加权平均求 N 个截面的最佳转角 α。接着，按相同过程计算另一个坐标轴的最佳转角。最后将计算结果输出。

(2) 工艺补充部分的设计

工艺补充部分的设计，包括工艺延伸面和压料面的设计。工艺延伸面的主要作用是使制件容易成形，包括形成简单的侧壁，使制件各处拉深均匀，使凹模形状简化。覆盖件模具 CAD 系统采用网络控制法完成工艺补充部分设计。此方法主要包括三个步骤，即控制网络的生成、基于网络的截面线设计和“蒙面”造型。

控制网络是由剖切零件的一系列平面，即由沿 X 轴方向和沿 Y 轴方向的两组平面组成。在控制网络生成以后，以其为基础进行截面线设计。设计过程为：

1) 将控制网络所在平面和零件相交，得到一条交线；
2) 将此交线变换到 X-Y 平面；
3) 根据交线形状，选取合适的控制截面线；
4) 将控制截面线安装到交线的两端；
5) 将控制截面线变换到相应的空间位置；
6) 重复上述过程，直至完成全部截面线的设计。

控制截面线是根据工艺补充部分的要求而设置的参数化形状，它有四种形状类型，如图 9.9-68 所示。为了快速完成截面线的设计，开发的系统包括截面线的生成、变换、修改等功能。另外，截面线一般要求和交线保持光滑连接，为此也具备相应的处理功能。

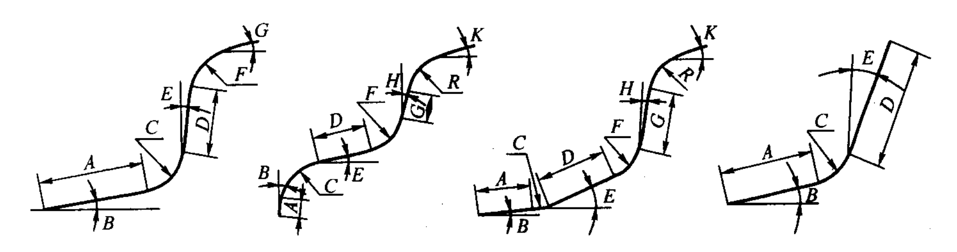


图 9.9-68 工艺延伸面的几种典型控制截面线形状

沿覆盖件的纵向和横向设计一系列截面线，在完成了截面线的设计以后，可以看出拉深件的初步形状。图 9.9-69 所示为集风板零件的截面线设计结果。截面线设计完成后，通过“蒙面”造型便可生成拉深件形状。图 9.9-70 所示为设计的工艺补充面和最终的拉深件的形状。

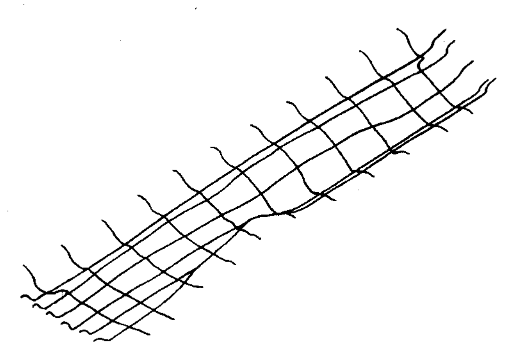


图 9.9-69 一个汽车零件的截面线

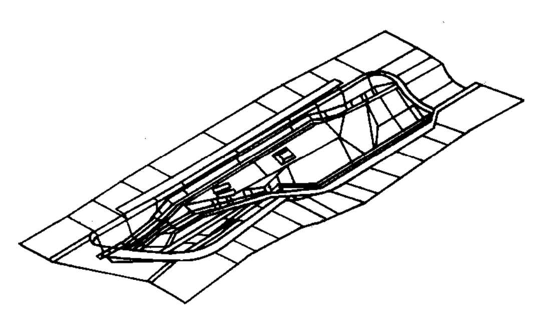


图 9.9-70 最后生成的拉延件形状

(3) 拉延筋设计与布置

覆盖件拉延时，在压料面上通常需设置拉延筋，其目的在于增加变形阻力，调节进料阻力，控制材料流入，防止毛坯起皱。常用的拉延筋有两种类型，即圆筋和方筋，其截面形状和参数如图 9.9-71 所示。

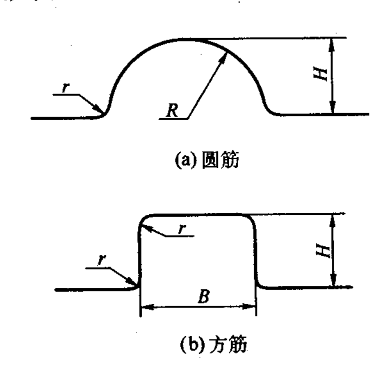


图 9.9-71 拉延筋的类型

在设计拉延筋时采用了特征设计的方法，可以方便快速地生成所需的拉延筋形状。其设计过程为：1) 选择拉延筋类型，输入截面形状参数；2) 指定拉延筋中心线；3) 指定拉延筋所依附的曲面和筋凸方向；4) 根据以上参数和几何实体，可自动生成拉延筋。

(4) 修边冲孔工序件设计

修边冲孔件设计的难点在于修边线的计算与设计。由于覆盖件是由形状复杂的自由曲面构成，传统的设计手段不能对修边线的尺寸进行精确的测量计算，通常采用经验的估算方法，难以保证设计质量。修边线是翻边展开后零件的外缘，它依赖于翻边特征 。由于覆盖件翻边时涉及复杂的变形情况，系统采用了通过截面线来计算翻边展开的方法：

1) 生成垂直于翻边线的截面；

2) 指定翻边特征；

3) 用翻边和截面求交，得到一条交线（图 9.9-72a），计算交线长度为 L_0；

4) 确定变形系数 λ（$\lambda \leqslant 1$），则翻边线展开长度 $L=\lambda L_0$；

5) 从翻边线与截面的交点 P_0 处开始，计算曲线长度为 L 的点 P_1，确定修边线的位置（图 9.9-72b）。



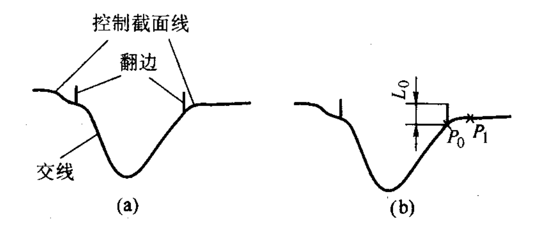


图 9.9-72　修边线计算

11　覆盖件模具结构设计

通常，覆盖件模具设计是指模具结构设计。随着 CAD 技术引入到模具设计中，模具设计的概念也发生了变化，采用 CAD 方法的覆盖件模具设计包括模具型面设计和模具结构设计。模具型面就是指上述冲压工序件的设计，模具型面一般要进行数控加工，所以必须采用三维设计。模具结构设计就是指除了型面以外的所有模具部件和零件的设计。覆盖件模具结构复杂、装配零件多，对于不同的冲压零件，模具的结构也各不相同。目前，用于覆盖件模具结构设计的 CAD 系统一般分为二维设计和三维设计两种。

11.1　基于典型结构的覆盖件模具结构二维设计

这种方法是在总结覆盖件模具的典型结构基础上，采用规范化的设计方法，通过 CAD 软件的二次开发，快速生成模具图。由于覆盖件模具结构尺寸大，要确定的参数多，参数的确定存在很大的随意性。模具型面形状复杂，模具零件的大部分形状和型面形状有关。零件的几何拓扑结构是变化的，例如减轻孔的个数和排列方式都是可变的。上述特点给软件的开发带来了困难，为解决这一问题，可以将零件形状分为两类，一是可由基本参数确定的形状，如压板台形状、减轻孔形状等。另一类是由模具型面确定的，拓扑结构变化的形状，如轮廓形状等。对于第一类形状，在设计中可直接按参数化方法设计，构造参数化原型图，在设计时对其赋以不同的参数，完成实例化。第二类形状特征的设计则比较复杂，需要对产品零件或工序件模型进行图形运算，软件二次开发的难度也更大。

(1) 总结典型结构

建立基于典型结构的二维覆盖件模具 CAD 系统，其首要任务就是总结模具的典型结构，这一工作需要设计人员和程序开发人员共同完成。设计人员的任务是总结出典型的模具结构图，而程序开发人员的任务是进行图形的规范化和参数化。以拉深模为例，可以有双动拉深模和单动拉深模典型结构，而单动拉深模又可分为整体式和分离式两种。典型结构总结后要绘出典型结构的参量图。

在得到典型结构的参量图后，下一个任务就是对形状进行分类，即分为可参数化的图形和不可参数化图形。参数化图形可采用参数化图形建模方法实现，而非参数化图形则需专门开发相应的软件，实现其图形的自动生成。

(2) 参数化图形建模

常用的 CAD/CAM 系统，如 AutoCAD、UG 和 Pro/E 等系统都提供了参数化特征建模功能。为了减少程序开发工作量，可以以这些系统为支撑，进行参数化图形建模。在设计时，可从参数化图库中调出所需要结构，用支撑系统的模型编辑功能，对模型赋予新的参数，生成参数化图形的一个实例，并插入到模具图中即可。

(3) 图形自动生成程序设计

覆盖件模具结构中的不可参数化的形状很多，程序实现方法各不相同。其中最典型的是减轻孔的布置和镶块式凸、凹模的分块，下面以分块点的设计算法为例说明程序的设计方法。

设计镶块式凹模首先要解决的问题就是确定镶块的分布。镶块式结构的特点是沿工序零件的轮廓线分布着一系列相互邻接的镶块。凸模和凹模镶块的基本分布表现为沿翻边或修边轮廓周边均匀分布，但镶块的划分不仅与翻边或修边轮廓形状有关，而且还要考虑在冲压过程中材料的变形情况。划分镶块时存在大量规则约束，即使是由设计人员手工划分镶块，由于考虑问题的侧重点的不同也可能产生不同的设计结果。也就是说，存在着设计结果的不惟一性，完全由计算机完成镶块的划分就更为困难。

每个镶块由相邻的两个分割点确定，因此划分镶块可归结为确定镶块分割点的问题，即分块点设计。在镶块划分中应遵循镶块设计的原则，并使镶块划分具有一定的灵活性。

系统采用的是一种弦接多边形法，其设计步骤如下。

1) 根据轮廓线的形状特点选取能大致反映轮廓线形状的转折点，这些转折点组成一弦接多边形，设多边形的边数为 N。

2) 在弦接多边形的每条边上根据镶块长度尺寸 L 大致均匀生成 N 组点。

3) 在各个点上作边的垂线与轮廓线相交得到 N 组分块点。

4) 增加、删除、移动分块点位置。

弦接多边形法适应能力较强，可以根据轮廓线的复杂程度选择转折点的个数，从而能保证分块点划分的合理性，图 9.9-73 是弦接多边形法的流程图。

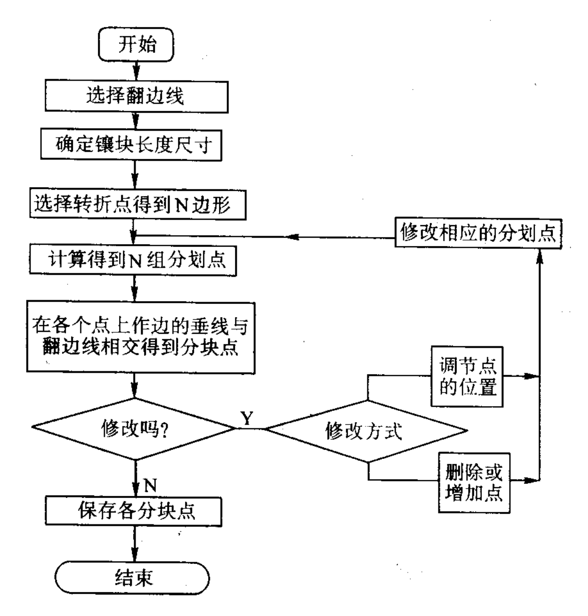


图 9.9-73　弦接多边形法流程图

镶块位置确定后，就可以在相应位置构造镶块，在这基础上设计安装台、空刀、螺钉孔、销钉孔等基元特征，最后与工序零件的几何曲面运算得到凹模刃口。

需要指出的是，基于典型结构的覆盖件模具结构设计方法，模具设计效率非常高，但其适用范围则有一定限制。由于覆盖件模具结构有多种结构类型，总结典型结构和程序实现的工作量都很大。另一方面，由于不同的用户所用的典型结构不一样，要使总结出的典型结构，满足所有用户的需要是不可能的，也是不现实的。因此，这种方法适合于结构形式相对比较简单的双动和单动拉延模、垂直修边模和垂直翻边模。对于带斜楔机构的修边模和翻边模，用典型结构很难表示，最好是采用三维设计来实现。

11.2　基于特征的覆盖件模具结构三维设计

根据覆盖件模具的类型，其模具结构设计系统由拉延模设计、翻边整形模设计、修边冲孔模设计和标准件设计等部分组成。由于覆盖件模具结构种类繁多，处理起来比较复杂，可以采用基于特征的设计方法，即根据模具结构的不同特点进行特征的分类描述，然后按不同的特征采取相应的设计方法。

11.2.1　覆盖件模具结构特征

覆盖件模具结构特征可划分为三个层次，即覆盖件模具基本结构特征层、功能组合特征和基元特征。覆盖件模具基本结构特征层表达了覆盖件模具的基本结构，包括模具的一些总体功能与结构信息，是功能与结构的连接点，它与冲压工艺特征存在映射关系。覆盖件功能组合特征是指模具功能零部件，完成一定的功能，与其他功能组合特征一起构成了覆盖件模具基本结构。基元特征是组成模具结构特征的最小单元，它可以是标准零部件或是零件的一局部特征。它具有几何属性、工程属性、语义属性等。功能组合特征是基元特征的有机组合。

（1）覆盖件模具基本结构特征

由于覆盖件零件曲面形状的复杂性、冲压工艺组合方式的灵活性，以及设计人员经验和设计风格的不同，使得覆盖件模具种类繁多，结构多样。覆盖件模具基本结构特征可以按覆盖件冲压工艺的组合方式，将其划分为单工序的简单模与多工序的复合模；按照覆盖件的基本冲压工艺可将其主要划分为三大类：拉深模、修边模、翻边模，它们可以是简单模，也可以是复合模。覆盖件模具的基本结构按其功能可用图 9.9-74 所示的树结构表示。

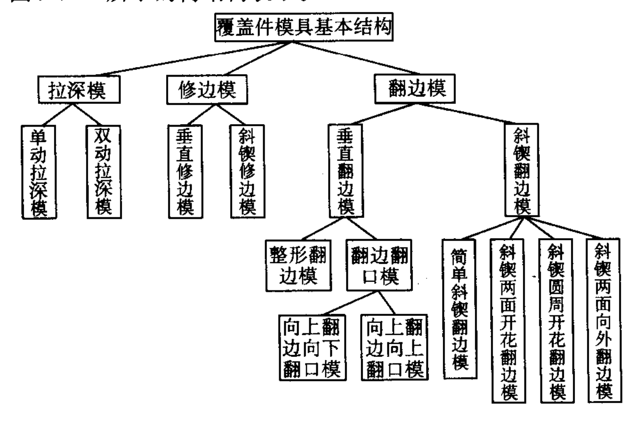


图 9.9-74　覆盖件模具基本结构的分类

（2）覆盖件功能组合特征及分类

覆盖件功能组合特征是指覆盖件模具功能零部件，它完成一定的功能，与其他功能组合特征一起构成了覆盖件模具基本结构。功能组合特征可按其完成的功能分类，如图 9.9-75 所示，可分为工作组合特征、安装组合特征和辅助组合特征。其中工作组合特征主要包括了凸模、凹模、顶件器、压料圈、斜楔滑块等完成覆盖件成形的工作零部件。安装组合特征主要功能是起安装、固定工作组合特征的作用，例如上模座、下模座等。辅助组合特征完成一些辅助功能，例如导向、起重、连接定位等。

（3）基元特征

基元特征是组成模具结构特征的最小单元。它主要用于表示一些基本几何形体、标准件和典型局部结构等。基本几何形体主要包括：基本几何体，例如球体、圆柱体、六面体、圆锥体等；拔高体、扫动体、旋转体等由二维几何轮廓或曲面经拔高、扫动、旋转等运算而得的三维几何体。

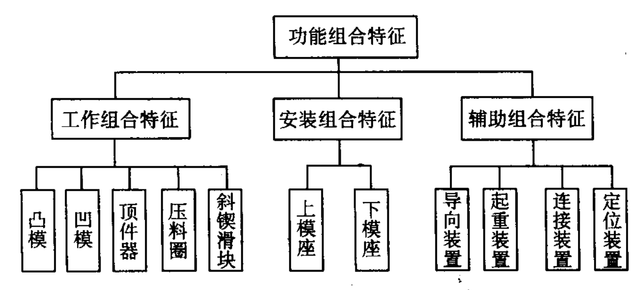


图 9.9-75　功能组合特征的分类

11.2.2　基于特征分层的覆盖件模具设计

采用覆盖件模具特征后，覆盖件模具的设计过程，即为覆盖件模具特征的功能与结构不断分解实现的过程。由覆盖件工艺特征约束层到覆盖件基本结构特征层，到功能组合特征层，进而到基元特征层的设计过程，设计的依据就是所建立的分层特征模型。

（1）模具基本结构特征的设计

模具基本结构特征的确定，可通过冲压工艺特征与模具基本结构特征之间的映射关系实现。根据冲压工艺特征的工艺语义中表达的对工序零件的工艺要求，可以确定模具基本结构特征中功能语义信息，从而可确定模具的结构类别与基本构成信息。

模具基本结构特征中功能语义信息与冲压工艺特征的工艺语义具有对应关系，因而可以根据功能语义信息进行结构类型的判定。覆盖件模具的各种典型基本结构，可按其功能信息用树的形式保存，通过该树的搜索确定相应的基本结构。

（2）模具功能组合特征的设计

功能组合特征设计时，可以由覆盖件模具基本结构特征中的模具闭合高度、中心线、设计基准点等信息，以及从工艺特征中继承的工序零件几何信息，确定模具功能组合特征的相互位置以及功能组合特征设计时所需的一些输入参数信息。

当功能组合特征从基本结构特征中通过约束关系得到其设计所需的参数之后，就可以进行功能组合特征的详细设计了。功能组合特征的详细设计是模具结构设计由部件到零件、到局部特征的逐步细化的过程。设计的主要依据为特征的一些几何属性、分布属性、工程属性和模具设计公式、设计准则与经验知识等。

（3）模具基元特征的设计

基元特征是模具结构特征的最小单元，它主要通过两种方法设计。

1）由二维几何轮廓或曲面经拔高、扫动、旋转、平移、剪切等运算而得到三维几何体。这些基元特征一般与工序零件有关，例如凸模的工作型面、翻边线拔高体，下底板上的窝座等。

2）通过相应的参数化设计功能直接生成基本几何体，标准件与一些典型结构的生成就是用这种方法，即先进行零件和典型结构的参数化造型，调用时通过赋予新的参数、位置和方向生成新的实例，然后装配到覆盖件模具结构中。

编写：李志刚（华中科技大学）

第 10 章　注射模 CAD

1　注射模 CAD/CAE/CAM 概述

1.1　注射模 CAD/CAE/CAM 的发展

常用塑料如聚氯乙烯、聚乙烯、聚苯乙烯、ABS 等，在 20 世纪 40 年代才问世，注射模具的历史也不过 50 余年，但发展速度却异常迅速。塑料工业对模具的迫切需要是注射模具 CAD/CAE/CAM 技术发展的原动力，而塑料流变学、几何造型技术、数控加工以及计算机技术的突飞猛进又为注射模具 CAD/CAE/CAM 系统的开发创造了条件。

从 20 世纪 60 年代开始，英国、美国、加拿大等国的学者如 J.R.Pearson（英）、J.F.Stevenson（美）、M.R.Kamal（加）、K.K.Wang（美）等开展了一系列有关塑料熔体在模具型腔内流动与冷却的基础研究。在合理的简化基础上，20 世纪 60 年代完成了注射过程一维流动与冷却分析程序，70 年代完成了二维流动与冷却分析程序，其后开展三维流动与冷却分析，并把研究扩展到保压分析、纤维分子取向以及翘曲与变形预测等领域。近年来开展了流动、保压、冷却、应力分析等注射工艺全过程的集成化研究。这些卓有成效的研究成果，为开发实用型的注射模工艺过程分析软件奠定了基础。

计算机的发展是注射模 CAD/CAM 能够推广运用的一个重要原因。在 20 世纪 70 年代，模具 CAD/CAM 系统使用的大多为中小型机。这种集中式分时系统运行速度慢、价格昂贵、难以推广。80 年代初推出的以 16 位微处理器为核心的个人计算机，其功能可与高档小型机相媲美；其后又推出功能更强大的 32 位工程工作站，分布式的系统可将多个模具工作站连成局域网，实现快速信息通信与资源共享。目前，微机的性能已经达到甚至超过一般图形工作站，而其价格也逐年降低。

注射模 CAD/CAM 能够推广与普及的另一个原因是几何造型技术、CAM 技术的飞速发展，它使得在计算机上能够较快地设计出具有复杂型腔表面的注射模，并方便迅速地加工制造出来。从 20 世纪 60 年代的线框模型的 CAD 系统到 70 年代的以曲面造型为核心的 CAD/CAM 系统、80 年代的实体造型技术的完善，以及随后出现的三维参数化特征造型系统，为注射模采用 CAD/CAM 技术提供了可靠的保证。目前在国际市场上已推出一批商品化的 CAD/CAM 系统，如 Autodesk 公司的 AutoCAD 系统、UGS 公司的 Unigraphics 系统、PTC 公司的 Pro/E 系统等，并成功地运用于注射模的设计与制造。

近十多年来，注射模 CAD 技术在不断进行理论和实验研究的同时，已发展到实用化阶段，一些商品化软件逐步推出，并在推广和实际使用中不断提高和完善。国际上著名的商品化软件如下。

1）澳大利亚 Moldflow PTY 公司的 Moldflow 系统。该系统具有很强的注射模分析模拟功能，包括有限元网格生成软件 FMESH，流动分析软件 FLOW，冷却分析软件 COOLING，流动、冷却分析结果和模架应力场分布的可视化显示软件 FRES，以及翘曲分析模拟软件。

2）美国 GRATEK 公司的注射模 CAD/CAM/CAE 系统。该系统包括三维几何形状描述软件 OPTIMOLDⅢ，二维注射流动分析软件 SIMUFLOW，三维有限元流动分析软件 SIMUFLOW 3D，冷却分析软件 SIMUCOOL，标准模架（美国 DME 标准）选择软件 OPTIMOLD 等部分。

3）美国和意大利的 Plastics & Computer Inc 公司的 TMCON-CEPT 专家系统。该系统包括材料选择 TMC – MS、注射工艺条件和模具费用优化 TMC – MCO、注射流动分析 TMC – FA、型腔尺寸设计 TMC – CSE 和模具传热分析 TMC – MTA 等功能模块。

4）德国 IKV 研究所的 CADMOULD 系统。该系统具有注射模流动分析、冷却分析和力学性能校核的功能，CADMOULD – MEFISTO 系统则采用有限元法进行三维型腔的流动分析。

由于注射模 CAD/CAM 技术的广泛应用前景，一些公司还推出专用的注射模设计模块，如 PTC 公司的 Pro/MOLDESIGN、UGS 公司的 MoldWizard，可用于三维注射模设计。

近年来，我国的研究人员在注射模 CAD/CAE/CAM 的研究中，取得了一系列可喜的成果，许多已在生产实际中成功应用，并取得显著效益。

华中科技大学是国内较早自行研究开发注射模 CAD/CAE/CAM 系统的单位，自 20 世纪 80 年代中期开始，就在注射模流动分析模拟和冷却分析模拟的研制方面进行了多年的研究与开发工作，推出了塑料注射模 CAD/CAE/CAM 系统 HSC。该系统包括塑料制品三维形状输入、流动模拟、冷却分析、型腔强度与刚度校核及模具图设计与绘制等功能，在一些企业单位应用，取得良好效果，现已实现商品化。

浙江大学基于工作站的 UG 系统开发出精密注射模 CAD/CAM 系统。该系统采用特征造型技术构造产品模型，使形状特征表达与工艺信息描述统一，并利用特征反转映射实现了型腔模型的快速生成。

上海交通大学对注射模 CAD 进行了研究，将人工智能技术引入注射模 CAD 系统中，开发出集成化注射模智能 CAD 系统。

北京航空航天大学华正模具研究所研制的注射模 CAD/CAE/CAM 系统具有塑料产品线框造型、曲面造型、分析模拟和数控仿真与数控加工程序生成等项功能，特别是数控加工部分具有很高的技术水平与实用价值。

合肥工业大学在注射模结构 CAD 技术方面进行了多年的研究与开发工作，研制出微机注射模 CAD 系统 IPMCAD。IPMCAD 3.0 系统在微机上采用三维实体模型、实体造型技术，使系统在设计效率和通用性两方面都得到较好的兼顾。

1.2　注射模 CAD/CAM 系统的工作流程

注射模 CAD/CAM 系统的工作流程如图 9.10-1 所示。用 CAD/CAM 技术进行注射模设计与制造一般分为以下几个阶段。

（1）塑料制品建模

注射模 CAD/CAM 工作的第一步是建立塑料制品的几何模型。在传统的手工设计中，制品的形状是用一系列二维视图来表征的。对于形状复杂的制品，有时用二维视图很难十分清晰地描述制品的复杂部位，而不得不先制作真实的模型或样板，供模具设计师正确地绘制模具结构图或者供产品设计师对制品的外观和功能进行考核。采用 CAD/CAM 系统可以在计算机中建立制品的三维几何模型。这种几何模型可以在显示屏上旋转与放大，可以在任意部位剖切，还可以用逼真的彩色阴影图显示，在一般情况下可以省去模型或样板的制作工序。



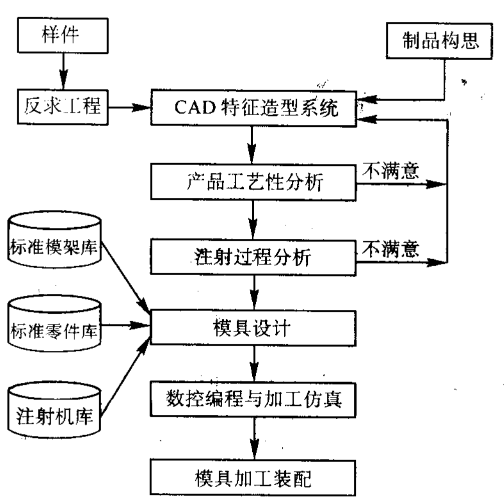


图 9.10-1 注射模 CAD/CAM 系统的工作流程

(2) 模具结构设计和工艺分析

在计算机中建立起制品的三维几何模型后，可以采用工艺性分析软件对该模型进行注射成形工艺性考核。例如检查制品的壁厚是否在成形的允许范围内，制品的流动长度是否超过了所用塑料的极限值，制品的塑料注射量是否超过了所用注射机的额定值，还可以对该制品的制造费用进行估算。如果对制品的某项成形工艺性不满意，便可对制品几何模型进行反复修改，直到满意为止。

当制品的注射成形工艺性通过检验后，下一步工作是确定该制品的浇口型式、数量和位置。在手工设计中，这项工作只能凭借经验或者简单公式进行粗略估算，设计师对浇口设计方案的正确性并不能做到胸有成竹，稍有差错便会导致无法挽回的错误。流动分析软件能够对设计师拟定的浇注方案进行多方面的导向和考核，它能帮助设计师在确定浇注方案时得到理想的塑料熔体流动形式，控制熔合纹的形成位置，减小制品某些敏感区域的应力。此外，流动分析软件还能用来选择较好的注射成形参数，例如塑料熔体的熔化温度和模具型腔温度等。

制品的浇注系统方案决定后，注射机喷嘴与制品之间的相互位置关系也就随之确定，模具结构的 CAD 工作便可开始。

模具尺寸首先取决于在一副模具内安排多少型腔。型腔数目的选择与许多因素有关。模具设计师可以借助专用软件来选择合适的型腔数目。例如，CAD 软件可以从制品的精度及经济性要求、注射机最大额定注射量、最小注射量、注射机装模空间、注射机最大锁模力等六个方面对模具型腔数目进行分析，并能综合以上各个因素推荐最佳型腔数目。

基于型腔数目、排列方式和浇注系统布置，注射模 CAD 软件能用来选择最合适的标准模架。其判断准则为所选用的模架中的推出板必须完全包容各个型腔，且又是所有可选模架中尺寸最小者。当模架尺寸确定后，模具设计师能方便地从标准模架库调出该模架的所有零件以及它们的装配关系。

标准模架选出后，接着是如何将制品几何模型转换为型腔几何模型和型芯几何模型，并把它们与模架几何模型合并以构成模具的装配图，制品与型腔、型芯形状之间的转换是借助于塑料材料收缩率补偿计算完成的。手工设计时，材料收缩率补偿通常是由模具设计师对制品二维视图的各个尺寸逐一进行换算。这是一件十分繁冗的工作。采用模具 CAD 技术后，尺寸的收缩补偿工作将变得非常简易。如果所用塑料材料的收缩变化范围小，且收缩均匀性好，模具 CAD 系统只需一个简单的变换比例的命令，就能完成制品的等距放大，然后将经过变换得到的型腔和型芯形状数据存储到数据库中。如果塑料材料在各个方向上的收缩特性存在着较大差异，也有相应的方法来进行材料收缩的补偿。例如，当塑料材料在熔体流动方向与垂直流动方向上存在着较大差异时，可以在制品上定义一个局部坐标系，其 x 轴和 y 轴分别对应于熔体流动方向和垂直流动方向，然后在 x、y、z 三个方向上选用不同的放大系数来补偿塑料材料的收缩。若模具设计师选用的 CAD/CAM 系统具有三维参数化造型功能，则可以直接对制品尺寸进行收缩率补偿。此时，既可将所有尺寸进行等放，也可以赋予各类尺寸不相等的缩放率，这取决于塑料材料的收缩特性。

将型腔和型芯的几何形状并入到模架相对应的模板中后，便可利用模具 CAD 系统提供的图形编辑功能划分出型腔组合模块（又称定模部装）和型芯组合模块（又称动模部装）。当需要采用斜抽芯机构时，还应划分出滑动模块。不同类型的模块可排在不同图层中，这样就可将各个模块形状分别地提取出来，以便后续的模具零件图设计与绘制。

划分模块的工作结束后，可进行浇注系统的结构设计。此时，可再次利用流动分析软件来平衡一模多腔的浇注系统，或通过调整各级分流道和浇口尺寸来优化制品的成型压力。冷却系统的设计紧接在浇注系统之后进行。在注射模设计中，冷却系统中管道布置常常与推出机构中推杆布置发生冲突。在采用 CAD 之前，冷却管路形式、冷却水温度与冷却管道布置等因素之间的关系很难分析计算，于是推杆布置便成为首要任务，冷却管道只得在推杆布置后所剩余的空间里安插，冷却效率与质量无法保证。这样，必然导致模具冷却时间过长、制品脱模时温度分布不均匀。冷却分析软件的应用可以改变以往模具设计师“重推出、轻冷却”的做法。在冷却管道布置时，模具设计师可同时考虑推杆与冷却管道的布置。当推杆与冷却管道发生冲突时，可以同时设计几种方案，然后利用冷却软件对这几种冷却回路进行分析，根据分析结果选择出最佳冷却回路，并确定该冷却回路合适的水流速度、水温、模具温度以及水泵压力等参数。

冷却系统完成后，便可将各个部装图与标准模架合并在一起，再加入推杆等模具零件。推杆等常用零件存放在模具零件库中供模具设计师调用，十分方便。商品化的模具 CAD 软件一般都有建库手段，以便用户在设计模具之前先建立自己的标准模架系列、标准模具零件系列、模具典型结构以及标准工艺规范。这些标准化的零件库和数据库能显著地提高模具 CAD 软件的设计效率。

整个模具结构设计完成后，设计人员还可以进行模具开合过程的运动模拟，检查模具零件之间是否产生干涉，并在屏幕上显示产生干涉的部位。这样，在模具制造之前就可以发现问题，减少返工。

(3) 数控加工编程和加工仿真

模具设计分析完成后，根据工艺规程要求，对模具零件例如型腔、型芯等进行数控加工编程，主要根据设计阶段生成的型腔和型芯的三维形状确定加工路径，生成刀位数据文件，并根据机床控制系统的要求自动生成加工指令代码。

2 注射模 CAD 的内容及特点

2.1 注射模 CAD 的内容

注射模 CAD 的主要工作内容包括如下几方面。

1) 注射制品的几何造型。采用几何造型系统，如线框造型、曲面造型和实体造型，在计算机中生成注射制品的几何模型，这是注射模结构 CAD 的第一步。由于注射制品大多是薄壁件，且具有复杂的表面，因此，常用曲面造型方法来产生制品的几何模型。

2）模腔面形状的生成。在注射模具中，型腔用以生成制品外表面，型芯用以生成制品的内表面。由于塑料的成型收缩率、模具磨损及加工精度的影响，制品的内外表面尺寸并不就是模具的型芯面与型腔面的尺寸，两者之间需要经过比较繁琐的推算，由于目前流行的商品化注射模 CAD 软件并未能较好地解决这种换算，因此制品的形状和模腔的形状要分别输入，工作量大且十分繁琐，如何由制品形状方便、准确、快捷地生成型腔和型芯表面形状仍是当前的研究课题。

3）模具结构方案设计。采用计算机软件来计算最佳型腔数目，引导模具设计者布置型腔，构思浇注系统、冷却系统和推出机构，为选择标准模架和设计动模部装图和定模部装图做准备。

4）标准模架选择。采用计算机软件来设计模具的前提是尽可能多地实现模具标准化，包括模架标准化、模具零件标准化、结构标准化及工艺参数标准化等。一般而言，用作标准模架选择的设计软件应具有两个功能，一是允许模具设计者输入本企业的标准模架，建立专用的标准模架库；二是能方便地从已建好的专用标准模架库中，选用设计中所需的模架类型及模具标准件。

5）部装图及总装图的生成。根据所选定的标准模架及已完成的型腔布置，模具设计软件以交互方式引导模具设计者生成模具部装图和总装图，模具设计者可利用光标在屏幕上拖动模具零件以搭积木的方式设计模具总图。

6）模具零件图的生成。模具设计软件能引导用户根据模具部装图、总装图以及相应的图形库完成模具零件的设计、绘图和标注尺寸。

7）常规计算和校核。模具设计软件可将理论计算和行之有效的设计经验相结合，对模具零件进行计算和校核，以验证模具结构中有关参数的正确性。

2.2　注射模 CAD 的特点

注射模是生产塑料制品的重要工艺装备。由于塑料注射成型工艺十分复杂，设计模具时要考虑的因素比较多。一般来讲，注射模具设计的特点主要如下。

1）外部约束条件多。要选择适合的塑料，并对所选塑料的性能参数及工艺条件进行认真考虑。要考虑因素包括：注射机的注射量、注射压力、锁模力、机架尺寸和刚度、塑料产品的形状结构、尺寸大小及使用场合和生产批量等。

2）结构复杂且灵活多变。注射模具包含模架、成型零部件、浇注系统、冷却系统和脱模机构等部分。成型零件一般由凸模、凹模和侧向抽芯机构等部分组成。浇注系统包括主流道、分流道和浇口等部分。冷却系统一般包括定模水道、动模水道和型芯中的冷却芯等部分。无论是模具整体结构，还是模具零件的结构，在设计时大都没有固定不变的准则，不同的设计人员往往设计出不同的模具结构方案，灵活性很大。

3）经验性和试探性强。注射成形工艺过程难以用定量关系来描述，并存在许多不确定的因素。因此，常规的注射模具设计离不开设计人员的经验，而且设计出来的模具一般都要经过反复的试模和修模过程。

上述特点反映到注射模 CAD 系统的开发方面，要求系统具有功能丰富、交互性、适应性强、用户界面友好等特点。具体来讲，注射模 CAD 的功能特点主要有以下几个方面。

1）注射模 CAD 系统必须具备描述物体几何形状的能力。由于注射模的工作部分（型腔和型芯）是根据产品零件的形状设计的，所以无论设计什么样结构的注射模，开始阶段必须提供产品零件的几何形状，这就要求注射模 CAD 系统具备描述物体几何形状的能力，即几何造型的功能，根据产品的几何形状确定注射模模腔的形状。

2）标准化是实现注射模结构 CAD 系统的有效手段。注射模结构设计一般不具有惟一性。即使对于同一产品零件，不同设计人员设计的模具不尽相同。为了便于实现注射模结构 CAD 系统，在建立注射模结构 CAD 系统时，首先要解决的问题便是标准化问题，包括设计准则的标准化，模具零件和模具结构的标准化。有了标准化的模具结构，在设计注射模时就可以选用典型的模具结构、标准模架、调用标准模具零件，而需要设计的只是少数工作零件。

3）设计数据的处理是注射模 CAD 中的一个重要问题。手工设计注射模所采用的设计数据大部分是以数据表格和线图形式给出，采用计算机辅助设计注射模，必须对这些数据表格和线图进行恰当处理，将其变为计算机能够处理的表达形式。程序化和公式化是处理数据表格和线图形式设计数据的基本方法，对于那些难以程序化和公式化的经验数据，就只能通过人机交互的方式予以解决。

4）注射模结构 CAD 系统应具有广泛适应性。注射模的结构随制品的不同而变化，同时模具的设计方式也因人而异，特别是目前设计标准在我国还未真正统一，各个行业乃至每个企业所采用的模架标准、结构标准、零件标准均不一致。模具的生产方式为单件的或小批量生产，所有这些，都要求注射模结构 CAD 系统必须具有广泛的适应性。

值得指出的是，流动模拟、冷却分析和保压分析等 CAE 软件的应用，大大降低了注射模设计对经验的依赖，可以在实际试模前预测可能出现的问题或缺陷，从而提高了模具设计的可靠性。

2.3　注射模 CAD 系统的结构

在传统设计中，模具设计人员首先根据制品图，进行模腔尺寸换算得到模腔图形，然后，通过型腔布置、标准模架选择、流道设计、动模和定模部装图设计、顶出机构设计、斜抽芯机构设计、冷却系统设计、总装图设计等步骤完成注射模总装图、部装图、零件图等的绘制。然而注射模复杂多变的结构形式和模具设计师风格各异的设计习惯给注射模 CAD 软件的开发增添了很大困难。为此，在注射模 CAD 软件开发之前必须对注射模结构设计的功能进行透彻的分析。在进行充分需求分析的基础上运用软件工程的分析和设计思想建立系统的功能模型和设计模型，以此为依据开发注射模 CAD 软件。

模具设计的主要任务是完成模具模型的建立和模具图的绘制。注射模设计是一个自上往下逐步求解的过程，其主要步骤如下。

1）确定模具结构的总体方案，包括型腔布置、模架选择等。

2）根据制品的特点，选择不同的模具结构进行功能单元的分配，如斜抽芯机构、冷却系统等都属于功能单元。

3）功能单元的细化，包括组成各种功能单元的零件设计及绘图。图 9.10-2 所示为注射模结构设计软件的结构图。

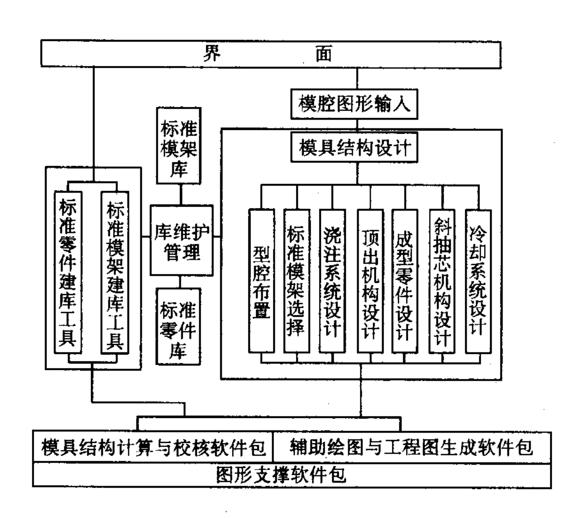


图 9.10-2 注射模 CAD 系统的总体结构

3 注射模总体结构的设计

实现注射模的总体设计，可有两种方案，即柔性化方案和基于知识的方案。前者采用装配关系模型，通过交互方式设计模具的总体结构，便于设计方案的修改，具有较大的柔性。后者将设计注射模总体结构的规则和经验保存在知识库中，设计时运用这些知识进行推理，获得模具的总体结构，并将其推荐给设计人员，加以确认或修改，以形成最终的设计方案。

3.1 柔性化的模具总体结构设计

这种设计方法首先确定模具的总体框架结构，总体设计的概略性，使模具结构的修改灵活、方便、快捷，使模具结构 CAD 系统具有柔性。在此阶段，通过设计方案的反复比较与修改调整，可优化模具总体结构，可确定各个零部件的基本类型和关键尺寸，然后以此为基础进行详细设计。

按照“自顶向下”设计流程的要求，总体设计阶段要完成的任务是确定模具的总体结构方案和主要零部件的类型与尺寸。为了使设计过程操作灵活、快捷，需要考虑如下几个方面的问题。

(1) 产品骨架构型

注射模 CAD 三维系统的初始输入信息是通过造型得到的塑料产品的特征模型。由于产品形状往往很复杂，完整的模型一般数据量都很大，使有关操作处理速度变慢，并且其造型过程繁琐，所需时间比较长。不过，总体设计阶段无需详细的产品模型，只需要它的轮廓骨架形体。当然，对模具结构有重要影响的一些形状特征必须描述，譬如产品是否有底，底部中心部位是否有通孔，侧壁是否有凸凹、通孔等等。

由产品骨架构型可以很快地得到其轮廓骨架模型。这种模型可为模具的总体设计提供足够的数据与信息，但其数据量小，处理速度快，有利于模具总体设计方案的反复比较与修改。此外，由于骨架构型可快速建立并作为模具结构设计的依据，使得模具总体设计可以和产品实际造型同时进行，获得一定程度的并行设计效果。

(2) 装配关系模型

“自顶向下”的模具总体设计，其目标是建立一个装配关系模型。所谓装配关系模型是对构成模具的各个零件形状及其相对位置关系与连接方式的一种描述。

对于模具来说，各种零件之间的装配关系比较固定，也就比较容易表示。特别是当使用标准模架时，更是如此。针对这种情况，有的学者提出装配树模型，用简单的树形结构实现。不过，装配树由于过于简单，不能完全表示出各零件间的所有联系，必须用其他方法来弥补。

为此，可采用有向无环图（DAG）来表示注射模具的装配关系。这种模型不但可以较好地表示各零件间的联系，而且可以方便地实现对同一零件的共享，从而节省存储空间。

模具中各零件间的连接关系常见的有如下几种。

1) 面接合关系（mate）。主要是指模板之间的贴合关系。

2) 嵌入关系（imbed）。指顶杆、型芯等与其固定模板之间的关系，是一种配合关系。

3) 穿通关系（through）。指导柱、顶杆、螺钉、螺杆和销钉等与被它们穿通的模板之间的关系。

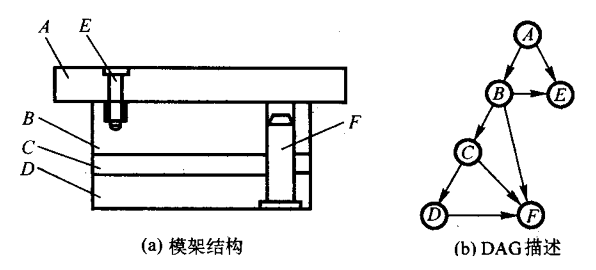
4) 旋入关系（screwin）。指螺钉、螺杆与被其旋入的模板之间的关系。

5) 贯串关系（permeation）。指一柱形零件同时与多个零件发生的穿通关系，可采用贯串表达式来描述各个被穿通的零件的名称、贯串形式（如嵌入、穿通、旋入等）。

6) 布尔关系（boolean）。指流道、水道形体与有关模板之间的差并运算关系。

上述几种关系中，贯串关系是一对多的，其他关系都是一对一的。但一个零件往往同时与多个零件建立不同的连接关系。例如，一块模板可能与另外的一至二块模板有面接合关系，与导柱有穿通关系，与螺钉（螺杆）有穿通或旋入关系；一根顶杆与某块模板有嵌入关系，而与另外多块模板有贯串关系等等。这些复杂的连接关系用 DAG 来表示比较适合。图 9.10-3 给出这种表示的实例。图 a 表示模架的部分结构，图 b 给出了其相应的 DAG 描述。

图 9.10-3a 中，模板 A、B、C、D 两两接合，螺钉 E 沉入模板 A 而旋入模板 B，导柱 F 嵌入模板 C 而穿通模板 B。所有这些零件在图 9.10-3b 的 DAG 中都构成结点。这些结点之间的有向边表示它们之间的连接关系，还带有相关零件的相对位置矩阵、被连接的某种对象的数目和排列方式等信息。



(a) 模架结构　　(b) DAG 描述

图 9.10-3 模架部分结构及其 DAG 图

因此，模板结点需有多个指针，指针数目为一块模板最多可能连接的零件种类数；柱类和杆类零件结点一般无需指针，但需记录它贯串哪几个零件及贯串的顺序。

3.2 基于知识的模具总体结构设计

注射模具的总体方案设计具有很强的经验性。在传统的设计方法中，一般都是由富有经验的模具设计师根据多年积累起来的经验，对新设计出来的塑料产品提出其模具的总体结构的设想，然后据此进行各个零部件的具体设计。由于经验难免存在某些局限，对问题的考虑也很难十分周全，总体方案的修改补充和设计过程出现反复经常发生，对于十分复杂的模具设计更是如此。

基于知识的系统（KBS）将模具设计的各种知识，包括各种设计规则和模具设计人员在设计实践中积累起来的非形式化的经验，经过整理和形式化转换，保存于知识库中。KBS 的推理机制从塑料产品的使用需求和生产需要、产品性能、工艺和用料等初始信息出发，运用知识库中的知识进行推理，决定模具的型腔数目、流道形式、浇口形式、侧抽芯机构类型、冷却系统的结构形式、模架的类型和模板的尺寸



等方案性问题，为模具设计人员提供总体方案的建议。

KBS 具有咨询和问题解答的能力，可根据用户的提问提出其建议，并进行较详细的解释。同时，这种解释能力对于设计新手的培训十分有用。

建立设计系统时，可采用规则框架模式描述确定性设计规则和模糊设计知识，实现推理机制和解释机制。

下面给出 KBS 的知识库中部分内容：

IF 塑件较小 AND 精度要求不高 THEN 使用多型腔

IF 塑件小 AND 年产量很大 THEN 使用多型腔

IF 塑件较小 AND 年产量较大且尺寸重复性要求不高 THEN 使用多型腔

IF 塑件精度和尺寸重复性要求高 THEN 使用单型腔

IF 塑件较大 AND 年产量不大 THEN 使用单型腔

IF 塑件较大 AND 须用侧向抽芯机构 THEN 使用单型腔

IF 使用多型腔 AND 年产量 > PR THEN 型腔数 = 「年产量/PR」

……

IF 使用多型腔 AND 年产量 ≤ PR THEN 型腔数 = 2

其中，PR 表示年产量的某一特定值，例如可取 PR = 30 000。

为了表示塑件的大小和年产量的大小，系统运用模糊专家系统的概念和理论，定义了一些模糊量词。

塑件分为小塑件和大塑件两类。小塑件分为很小、小、较小、不小等几个档次；大塑件分为不大、较大、大、很大等几个档次。这些量词由两个因素决定，一是塑件的投影面积（cm^2），二是塑件的体积（cm^3）或质量（g）。这两方面分别给予适当的隶属度因子。根据对于塑件的投影面积和体积（质量）的计算结果，得到两个关于小塑件或大塑件描述的可信度因子。求出这两个可信度因子的加权平均值，作为塑件大小档次划分的依据。

总体方案设计时，首先显示对话框，让用户输入塑件形状特点、基本尺寸、精度与质量要求、年产量和其它初始信息；从有关数据库读取必要的数据；运用知识库中的设计知识进行推理，为模具总体设计提出可行方案，供设计人员确认或作修改。然后，采用装配关系模型，对 KBS 得到的总体设计方案进行描述并显示出来，以便用户仔细检查和修改。

4 标准模架选用及编码

标准模架的选用是注射模结构 CAD 工作的一个重要内容。标准模架系列在设计工作开始之前，就已存放在数据库中供设计者选用，标准模架的组成如图 9.10-4 所示。

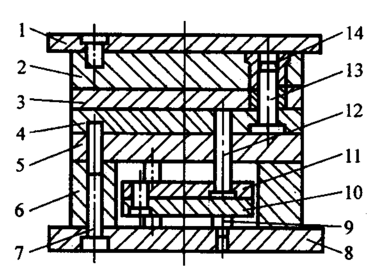


图 9.10-4 标准模架的组成

1—定模座板；2—定模板；3—推件板；4—动模板；5—支承板；6—垫块；7—内六角螺钉；8—动模座板；9—限位钉；10—顶板；11—顶杆固定板；12—复位杆；13—带头导柱；14—带头导套

日本、美国、德国等先进工业国家早已实现了注射模架的标准化，并已广泛运用到生产中。我国的注射模架系列也已有国家标准，并正在推广应用。

下面以我国许多厂家习惯采用的标准模架系列为例，介绍标准模架的选择和编码。该标准模架共有 10 种模架组合形式，44 种组合系列、31150 种规格。这 10 种组合形式分两大系列，Z 系列是定模无附加分型面的组合类型集合，属单分型面系列；T 系列是定模有附加分型面的组合类型集合，属双分型面系列。

由于模架结构形式的选择难以用数学方法来描述，选择与制品形状、顶出方式、注射机等因素有关，因而在很大程度上只能依赖于设计人员的经验来确定。按照图 9.10-5 所示的流程，模具设计人员能方便地选择出所需的标准模架系列。

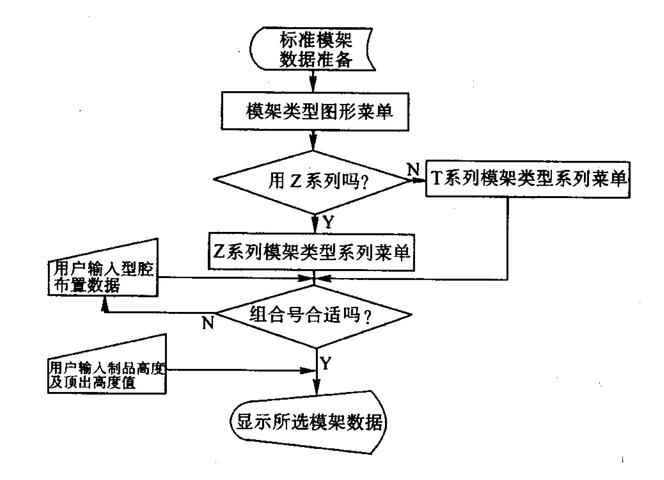


图 9.10-5 标准模架选择程序流程图

模架系列确定后，还需要确定该系列中合适的模具零件尺寸。因此，各种模架系列中的全部模具零件，均需要存放在数据库中以供查询。建立简明的编码系统也是一种行之有效的方法。

根据模具零件尺寸之间的隶属关系，在这样的编码系统里一般可采用链表数据结构和树状数据结构。链表结构属于顺序关系结构，程序通过指针对一组数据逐个访问，以选取合适的数据，可避免同一属性的数据项的重复存储，从而实现信息的压缩。例如，在决定顶杆长度时，只需存储对应规格顶杆的长度指针以及一组长度尺寸，查询时通过长度指针可以方便地选取合适的顶杆长度，如图 9.10-6a 所示。

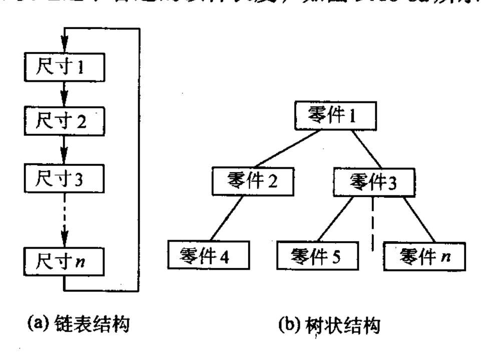


图 9.10-6 模具零件编码时的两种数据结构

树状结构属于层次关系结构。根据隶属关系，可将不同种类的模具零件安排在不同的层次里。例如，可将顶板放在第一层次，将动模板放在第二层次，因为一旦顶板的宽度确定下来，动模板的宽度也就确定了，这时可进入第二层查找在确定的宽度下合适的动模板长度，如图 9.10-6b 所示。

编码时，采用如下数据压缩技术可减少数据的存储。

1）以一种分离的尺寸量形式存储零件的几何数据，尽可能使每个存储单元存储最大的信息量。

2）以整型量代替实型量，因为双字节的整数在计算机内占16位，而实数占32位，因此应尽量将模具尺寸中的实数转换成整数形式编码。

3）同一属性的数据不重复存储，在编码时安排好必要的数据联系指针，做到同一属性的数据项只存储一次。

在编码系统的基础上，需要制定一组原则来选择模具零件的尺寸，并根据这些原则编制计算机程序，使模具零件尺寸的选择过程能够自动地或以人机交互的形式完成。例如，动、定模板的尺寸选择时，很显然应遵循两条原则：①顶板的宽度应大于型腔的总宽度；②在长度方向上，导柱的中心距离应大于型腔的总长度。第一条原则的依据是，所有推杆必须位于顶板的平面内，这就要求顶板宽应大于型腔的总宽度；第二条原则保证动模板在长度方向上能容纳下型腔和导柱。由于每种宽度的动模板对应着某一宽度的顶板，所以一旦顶板宽度确定下来。动模板宽度也就随之而定，动模板的长度则根据第二条原则确定。根据第一条原则选定动模板的宽度后，若宽度所对应的动模板所有长度尺寸均无法满足第二条原则，则动模板宽度和顶板宽度需增加一个档次，然后重新根据第二原则，选取合适的动模板长度，直到以上的两原则全部满足为止。这个选择过程可由程序自动完成，然后显示结果，由模具设计人员认可或修改。

5　镶拼式模具结构设计

在小型、精密接插件注射模设计中，成型模具多采用镶拼式结构，以满足型腔高强度、高耐磨、高精度及良好的互换性的要求。镶拼式结构是把型腔或型芯分解成若干镶块再拼合而成。该结构的工艺特点是以成型磨削加工为主要加工手段，变内型面加工为外型面加工，将镶块拼合装入定、动模板上已加工好的模孔内。

模具分块设计是十分复杂的，与成型零件尺寸大小、尺寸精度、定位精度、排列方式、加工手段等诸多因素有关。针对小型、精密接插件形状特征，可总结分块设计的原则如下。

1）镶块外形尽量简单，镶块数应尽量少，以减少装配工作量和过多的拼接痕迹。

2）同一镶块上的接合线应尽量平行或垂直，便于修配，加工时互为基准。

3）镶块的角度应为90°或钝角，避免锐角。

4）如果制品具有对称性，为便于加工，在凹模分块设计时应该沿对称线分开。

5）在分块时，应尽量让复杂的内形加工变为外形加工。

6）在分块时，应尽量让每个镶块具有良好的互换性。

7）镶块之间应尽量采用凹凸槽嵌接，防止在注射成型过程中发生相对位移。

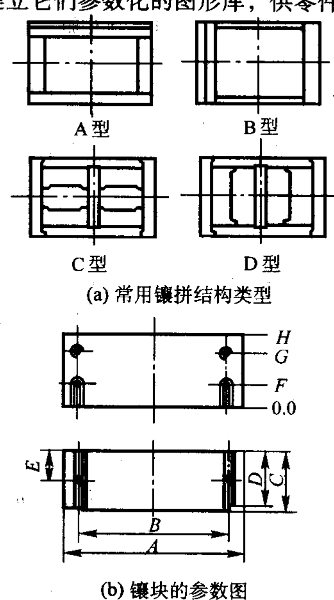
8）镶块之间的拼接线应尽量与制品脱模方向一致，以免渗入塑料，妨碍制品脱模。

9）个别容易磨损部分可单独做成一块，以便加工和更新。如在小型精密多腔注射模设计中，由于流道较长，压力损失大，磨损较严重，为便于修理和更新，常把流道和浇口单独做在流道板上。

10）接插件模具型芯多且细长，因此在型芯进行分块设计时，一定要控制其高径比，避免分块成细长型芯。同时要避免在正对着浇口处安置单独的型芯，以免型芯在注射成形过程中折断。

由于镶拼结构分块设计原则的灵活性，同时根据模具设计者的习惯和加工条件的不同也可能引起分块设计有多种方案，因而很难建立起小型、精密、多腔注射模镶拼结构设计统一的数学模型，这就给计算机编程带来了很大困难。采用自动设计与人机交互相结合的方式，来处理小型精密多腔接插件注射模镶拼结构图后，为用户提供各种交互方式进行镶拼结构的细部设计，并进行镶拼零件的分离。

首先，根据工厂的情况，建立起标准化的镶拼结构图及镶拼块图，如图9.10-7a所示。对于已标准化的镶块可利用建库工具，建立它们参数化的图形库，供零件设计时调用。



(a) 常用镶拼结构类型

(b) 镶块的参数图

图9.10-7　标准化的镶拼结构图及镶拼块图

然后，在已复制型腔布置及流道布置图的镶拼结构上，交互式地进行分块设计，生成定、动模镶拼组件部装图。其交互过程主要包括如下4种操作：①以型腔某条边为基准添加一条平行线；②选择分割点，从分割点绘制分块线；③延长分块线或型腔边；④对分块线进行编辑处理。

一旦定、动模镶拼组件部装图设计完成，就可以按交互方式从已设计完毕的部装图上进行分离镶拼零件的工作。首先，选择镶拼零件视图，然后在程序的提示下从部装图上选择出属于该镶拼零件的实体，分离后的零件视图可供零件设计时使用。图9.10－8为镶拼结构设计程序流程图。

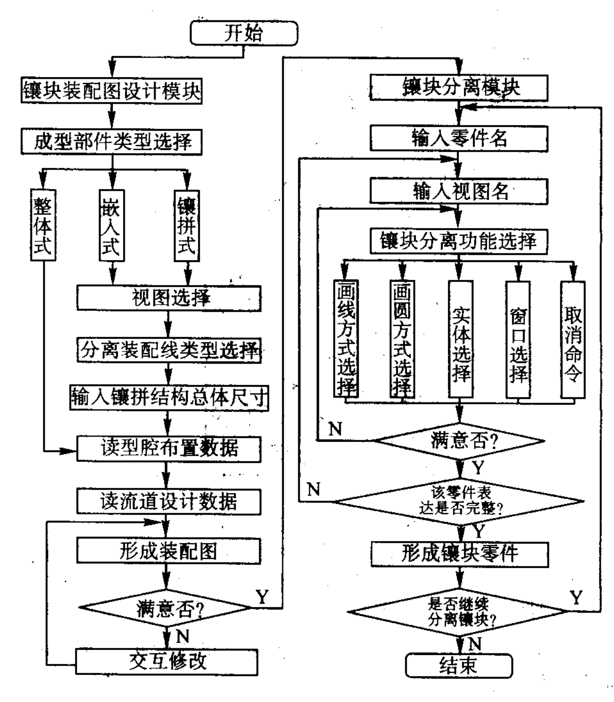


图9.10-8　镶拼结构设计程序流程图



6　成型零部件设计

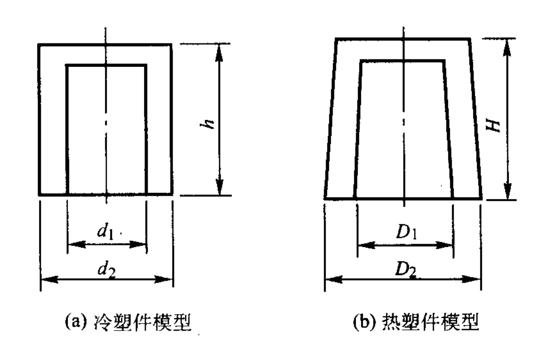
成型零部件的设计是以塑料产品的实体模型为基础进行的，其主要工作就是决定模具型芯和型腔的形状与尺寸。

6.1　成型零部件尺寸计算

（1）冷、热塑件模型

对塑料产品的实体模型进行形状映射可以得到模具型芯和型腔的形状。由于塑料产品的冷却收缩和零部件制造公差、配合间隙、磨损等因素的影响，会使实际生产出的塑料产品的尺寸和模具成型部位的尺寸不相等。

这里引入冷塑件模型和热塑件模型（图 9.10-9）。冷塑件是冷却后的最终塑料产品，系统对塑料产品进行造型的结果就是这种理想的冷塑件模型。



(a) 冷塑件模型　(b) 热塑件模型

图 9.10-9　冷、热塑件模型

热塑件模型是指成型腔中处于高温状态下的产品模型。其形状和尺寸完全由成型部位决定。随着温度的下降，热塑件各部位尺寸将收缩。完全冷却后，热塑件就变成了冷塑件。

可以看出，在不考虑模具热膨胀的情况下，热塑件模型的形状和几何尺寸同模具成型腔的相应部位完全一致。也就是说，可从热塑件模型上提取形状和几何尺寸用于构造模具的成型部位的图形。

引入冷、热塑件模型后，可以将注射模成型部位模型的产生分三步进行。

1）使用塑料产品的基本尺寸建模，得到冷塑件模型。

2）对冷塑件模型各部位尺寸进行换算，得到热塑件模型。

3）由热塑件模型经形状映射得到成型部位模型。

（2）热塑件模型尺寸确定

首先需考虑塑料产品尺寸的公差要求。塑料产品的实际尺寸只要在允许的误差范围内都是合格的。有关塑料产品的尺寸公差标准可参照基础数据库里存放的标准。由于公差等级决定公差带的大小，在进行尺寸变换之前还要确定塑料产品的公差等级。

塑料收缩率是影响成型部位尺寸的重要因素，一般使用平均收缩率来计算其影响。模具还常设置脱模斜度以利脱模，这主要影响成型部位的径向尺寸。除此之外还有一些其他因素；但这些因素造成的总误差不应超过产品的尺寸公差。这样，除脱模斜度和收缩率之外，所有其他因素造成的误差总和可以用公差值乘以一个系数来加以修正。

考虑到成型部位不同尺寸受以上各种因素影响的程度不同，这里将尺寸分为五类：

1）塑料产品外形径向尺寸，即型腔内形尺寸；

2）塑料产品内形径向尺寸，即型芯外形尺寸；

3）塑料产品外形高度尺寸，即型腔深度尺寸；

4）塑料产品内形高度尺寸，即型芯高度尺寸；

5）中间距尺寸。

尺寸计算公式分别为：

1）$L_r = L_1 + (L_1 - d_k)S_p - \alpha_1\Delta$；$L_r' = L_r - k$

2）$l_r = l_1 + (l_1 - d_k)S_p + \alpha_2\Delta$；$L_r'' = L_r + k$

3）$H_r = H_1 + H_1 S_p - \alpha_3\Delta$；

4）$h_r = h_1 + h_1 S_p + \alpha_4\Delta$；

5）$D_r = D_1 + (D_1 - d_k)S_p$

式中，L_r、H_r 分别为热塑件外形径向尺寸和高度尺寸；l_r、h_r 分别为热塑件内形径向尺寸和深度尺寸；D_r 为热塑件孔间距；L_1、H_1 分别为冷塑件外形径向尺寸和高度尺寸；l_1、h_1 分别为冷塑件内形径向尺寸和深度尺寸；D_1 为冷塑件孔间距；S_p 为塑料平均收缩率；Δ 为塑料产品尺寸公差；d_k 为金属嵌件的外形尺寸；α_1、α_2、α_3、α_4 为系数；L_r'、L_r'' 为考虑脱模斜度后的尺寸；k 为受脱模斜度影响的收缩量，可表示为 $k = 2h\tan\alpha$，其中 α 为脱模斜度，h 为高度。

尺寸变换时遍历整个冷塑件模型，对每个形状特征一一进行计算与变换。当所有的形状特征调整完毕，更新整个模型，完成尺寸的驱动过程，即得到热塑件模型。系统在进行尺寸参数变换时，自动判别尺寸属于以上五类尺寸中的哪一种，并采用合适的计算公式。上述公式中的系数选取使用对话框界面，由用户确认或修改。

使用上述公式还应注意以下问题。

1）对于大型模具，需考虑模具成型零部件热膨胀对尺寸的影响。

2）塑料收缩率的取值需考虑其变化范围的大小。对于收缩率范围小的塑料，取其平均值即可；对于收缩率范围大的塑料，应根据产品的壁厚和形状酌情确定，对壁厚较大者取大值。

6.2　分型面的确定

分型面是指用于分开模具以取出塑料制件的面。一般情况下用一个分型面即可，某些情况下也可能包含多个分型面。分型面的形状有平面和曲面之分。从与开模方向的相对位置来分，分型面有垂直分型面、倾斜分型面、平行分型面几种。

分型面的确定应遵循下面的原则。

1）分型面应开在塑料产品最大轮廓处。

2）由于浇口和分流道经常处于分型面上，选择分型面要考虑便于浇注系统的设计。

3）避免在制品的光亮平滑处或圆弧过渡处开设分型面，以免留下溢料痕迹。

4）尽量避免使用侧向抽芯和分型机构。

5）分型面的选择应有利于开模时将产品留在动模一侧，以利脱模，简化模具结构。

6）对同轴度要求高的塑件，最好将要求同轴的部位放在分型面的同侧。

7）尽量将抽芯距离长的方向放在动定模的开模方向，避免侧向长距抽芯。

8）分型面选择应使模具结构简单。

由于分型面的确定有很多的经验成分，因此进行分型面设计时，与模具设计人员的交互是必要的。

为了说明分型面及如何确定分型面的问题，引入凸包盒的概念。模型的凸包盒是一个能将模型包住的最小盒体（长方体），盒体的各条棱边分别平行于相应坐标系的 x、y、z 轴。模型在坐标系空间沿 x、y、z 轴方向平移只会改变凸包盒的位置，不会改变其大小。但模型旋转时可能引起凸包盒大小改变。

分型面的确定可以描述如下。根据塑料产品的热塑件模型生成一个凸包盒实体模型，规定热塑件模型所在的坐标系 z 轴方向表示开模方向，其正向指向定模一侧，负向指向动模一侧。将凸包盒实体模型的各棱分别延长一个固定的长度，得到准凸包盒模型。使用实体模型的差操作，将热塑件模型从准凸包盒实体模型中减去，得到一个含有空腔的模型，空腔形状与热塑件的形状完全相同。这个空腔模型是一个连续的欧拉形体。现在定义若干有界的切割面，将该模型分为独立的两半，其中一半属定模，另一半属动模。如果定义的切割面可以完全将模型分为两半，则称切割面是完备的。显然，切割面包含了通常所说的模具分型面。

所要设置的切割面/分型面的最少个数和塑料产品的形状有关。对于无通孔的产品，一个分型面即可分开动定模；如果产品包含通孔，则在每个通孔处还应设有辅助分型面。

系统首先找出可能的分型面位置。由于分型面常开在塑料产品的形状分界点，表现在产品的实体模型上就是轮廓线，因此可以遍历产品模型找出所有的轮廓线，再根据上述原则确定可能的分型面位置并储存起来。分型面确定的流程图如图 9.10-10 所示。

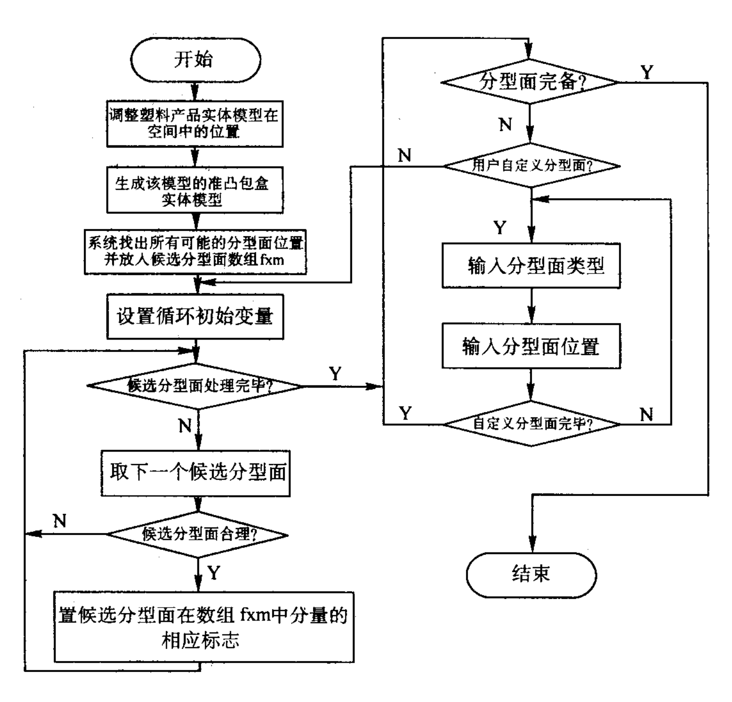


图 9.10-10　分型面确定流程图

6.3　成型腔壁厚计算

注射模应有足够的刚度以保证在填充过程中不会因变形而发生溢出，并顺利地脱模；同时还应有足够的强度以承受注射过程中的各种拉伸、剪切和弯曲应力而不致损坏。因此，在设计时必须保证成型腔的壁都和底部具有足够的厚度。

可从保证模具的刚度和强度两个角度出发计算成型腔最小厚度。鉴于型腔形状复杂与多样，准确计算要涉及很多因素，因此，进行计算时取成型腔的简化模型，并考虑适当的安全系数，以确保模具满足刚度和强度条件。

成型腔按形状可分成三类：圆柱形型腔、长方体形型腔和异形型腔。成型腔的主体形状为圆柱形、圆锥形，归入第一类；主体形状为长方体形，则归入第二类；其他不规则形状归入第三类。对第三类形状的型腔，由用户决定是否进行刚度、强度计算以及计算的依据。型腔按结构分为整体式型腔和组合式型腔，后者要求腔壁更厚一些。

刚度和强度条件对壁厚的要求往往不相同。一般来说，小尺寸型腔壁厚的确定可以只考虑强度条件；大尺寸型腔则主要考虑其壁厚要满足刚度条件。系统中不区分型腔的大小，对每种型腔都同时进行刚度和强度计算，取较大的壁厚作为设计值。

对成型腔壁厚的设计分计算和校核两步进行。在模具设计初期，根据刚度和强度条件计算得出成型腔最小壁厚，并据此选择相应的模板。在模具设计后期，再对成型腔进行刚度和强度校核。

6.4　凸、凹模模型的生成

利用热塑件模型可以生成凸、凹模的实体模型，即将外轮廓实体从定模板实体中减去，形成凹模，将内轮廓实体与动模板进行并运算可得到凸模。

热塑件模型包含了完备的成型部位工作表面的形状及尺寸信息。利用这些信息，如参数化实体模型的点、边（包括直线、圆锥曲线、NURBS 曲线）、面（包括平面、圆锥曲面、球面和 NURBS 曲面）和特征等信息，也可以自动构成凸、凹模实体模型。

对形状复杂的产品，可能需要使用侧向成型和抽芯机构以利脱模，或对产品的某些部位采用镶/嵌块以改善工艺条件。在这种情况下，为了正确确定使用侧芯或镶/嵌块成型的部位，设计人员的介入是不可缺少的，即需要将程序自动识别及与模具设计人员的交互操作结合起来。

图 9.10-11 给出了利用热塑件模型表面信息生成凸、凹模模型的设计流程。

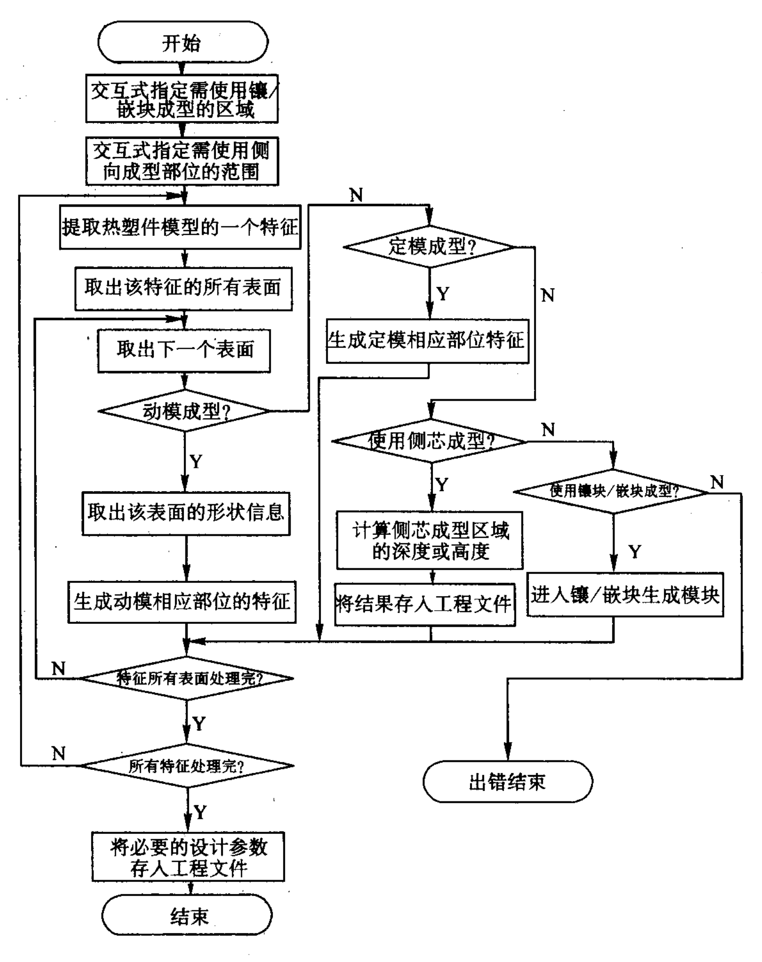


图 9.10-11　凸、凹模模型的设计流程

7　流道系统的设计

7.1　流道系统的结构

流道系统又称浇注系统。图 9.10-12 所示为一个四型腔模具的典型流道系统。从图中可见，流道系统通常由主流道、分流道、浇口和冷料井组成。流道系统是整个模具设计中最重要的部分，设计的好坏直接影响到塑料制品的成型质量，因此必须给予足够的重视。

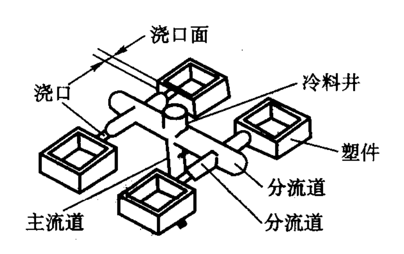


图 9.10-12　流道系统

分流道的设计要求散热少、压力损失小，流道中所容纳的塑料量尽可能少。常用流道从截面形状上可分为四类：圆形、正方形、半圆形和矩形，如图 9.10-13 所示。

为了减少压力损失，流道截面应该较大，而要求散热少，流道的表面积应尽可能小。因此，可用流道的截面积和周长的比值表示流道的效率，比值愈高，流道效率愈高。从图 9.10-13 中可以看出，圆形和正方形截面的流道效率较高。正方形截面的流道难于脱模，在实际生产中常使流道侧壁的角度增加，形成梯形截面。圆形流道加工较困难，两个半圆槽不易对中。

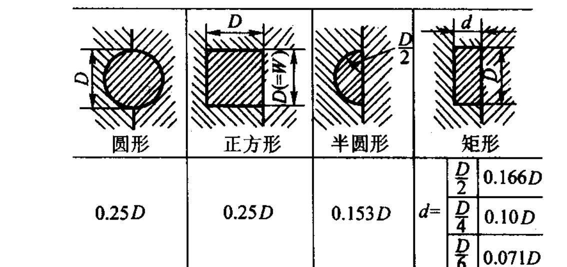


图 9.10-13　分流道四种常用截面形状

图 9.10-14 给出了几种型腔及流道系统的布局图。按流道布局形式的不同，流道系统可分为两类。一类为自然平衡的流道系统，如图 9.10-14a、d、f 所示。在这种系统中，每个流道的特征相同，熔体的流动是平衡的，每个型腔可在大致相同的压力、温度条件下同时充满，使得制品质量保持一致。另一类是非自然平衡流道系统，如图 9.10-14b、c、e 所示。在这种系统中，熔体流动是不平衡的。一模多腔时，每个型腔将在不同的条件下充满，如不采取适当措施，同一模具成型的制品在质量上会出现差异。

设计模具时，应尽量采用自然平衡的流道系统。对于非自然平衡的流道系统，可以通过计算程序，修改流道截面尺寸求得平衡，使模具内每一个型腔在同一时刻均能在近似相等的压力和温度条件下被熔体充满。



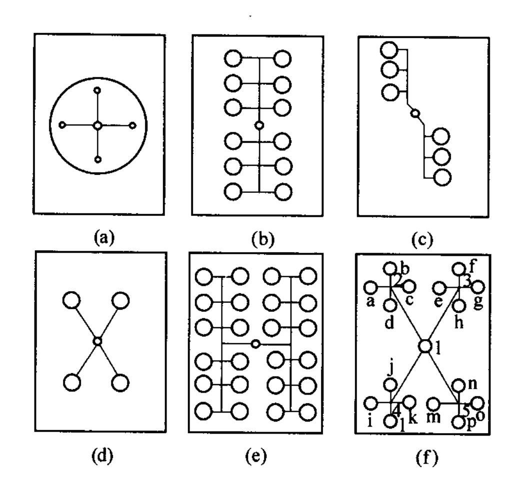


图 9.10-14　几种流道系统布局方案

7.2　流道系统的设计计算

流道 CAD 包括如下两部分工作。

1）流道送料机构设计。目的是使熔体在同一时刻到达每个型腔浇口的入口处，如图 9.10-15 所示。在具有多级分流道的复杂流道系统中，各分流道的截面尺寸不一样，流道送料机构设计计算的目的就是求出各分流道的截面尺寸。

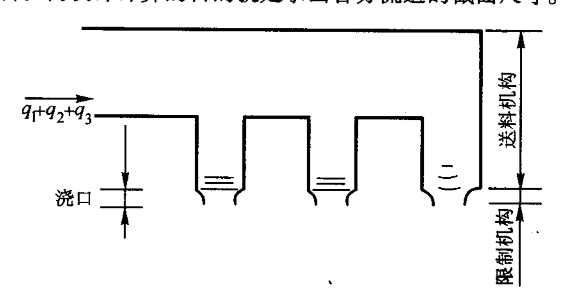


图 9.10-15　流道系统的送料机构与限制机构

2）流道限制机构设计。流道限制机构又称浇口，用以重新分配每个流动路径的体积流动率，使各型腔能同时被熔体充满，或者使多浇口型腔内熔体的熔合纹处于理想位置。图 9.10-16 所示为几种常见浇口型式。

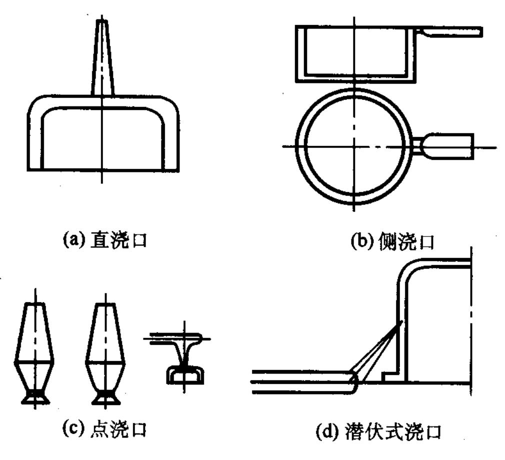


图 9.10-16　几种常见浇口

7.2.1　流道送料机构的设计计算

影响流道设计的因素很多且十分复杂，在流道 CAD 工作中，有必要作如下假定和简化。

1）假定注射成型时熔体的体积流量恒定。

2）忽略流道转弯处因局部阻力引起的压力损失。

3）用相同横截面积的圆管来模拟非圆截面流道。

4）由于浇口体积很小，熔体充满浇口的时间忽略不计。

绝大多数热塑性塑料都是非牛顿流体，当采用幂律函数模型来表征时，考虑圆管的泊肃叶（Poiseuille）流动，则流道系统中某流道 j 的体积流量 q_j（cm^3/s）可表为

$$q_j=\frac{n\pi a_j^3}{1+3n}\left(\frac{a_j\Delta p_j}{2KL_j}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{9.10-1}$$

式中，n、K 为幂律模型 $\gamma=(K\tau)^{\frac{1}{n}}$ 中的指数和比例系数；Δp_j 为流道 j 的压力降，MPa；L_j 为流道 j 的长度，cm；a_j 为流道 j 的半径，cm。

由式（9.10-1）可以分析出，流道 j 的轴向压力梯度 Λ_j 和流量 q_j 和半径 a_j 有如下比例关系：

$$\Lambda_j\sim\frac{1}{a_j}\left(\frac{q_j}{a_j^3}\right)^n \tag{9.10-2}$$

当熔体在分流道单元 j 内流动 Δt 时间后，熔体流动距离为 $v_j\Delta t$，速度 v_j 可表为

$$v_j=\frac{q_j}{\pi a_j^2} \tag{9.10-3}$$

分流道 j 在 Δt 后压力降有如下比例关系：

$$\Delta p_j\sim v_j\Delta t\Lambda_j\sim\left(\frac{q_j}{a_j^2}\right)\Delta t\left(\frac{1}{a_j}\right)\left(\frac{q_j}{a_j^3}\right)^n=\left(\frac{q_j}{a_j^3}\right)^{n+1}\Delta t \tag{9.10-4}$$

这就是说，如果要在 Δt 时间后，保持熔体在所有分流道里的压力降相等，q_j 与 a_j^3 的比值必须为常数，此时应有

$$q_j\sim a_j^3\quad(j=1,2,3,\cdots) \tag{9.10-5}$$

根据式（9.10-5），为了使流道系统中每个分流道皆保持恒定的体积流量，即各分流道的熔体流道彼此互不受影响，下式必须成立：

$$a_u^3=\sum_{i=1}^{d}a_i^3 \tag{9.10-6}$$

式中，a_u 为上游分流道半径；a_i 为下游分流道 i 的半径；d 为 a_u 处所具有的分支数。

参照图 9.10-17，对于图示流道分支，式（9.10-6）应为

$$a_u^3=a_r^3+a_s^3 \tag{9.10-7}$$

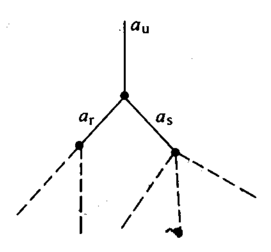


图 9.10-17　分流道简图

对于如图 9.10-18 所示的两个任意的具有公共上游分支的分流道，如果希望熔体能同时流到这两条路径的末端，则有下式：

$$\begin{aligned}\Delta t&=\frac{\pi a_r^2L_r}{q_r}+\sum_{k=1}^{m}\frac{\pi a_k^2L_k}{q_k}\\&=\frac{\pi a_s^2L_s}{q_s}+\sum_{l=1}^{n}\frac{\pi a_l^2L_l}{q_l}\end{aligned} \tag{9.10-8}$$

式中，m、n 为图 9.10-14 中所示两支路的流道数；q_r、L_r 和 q_s、L_s 为两支路上游流道的流量和长度；q_k、L_k（$k=1,2,\cdots,m$）和 q_l、L_l（$l=1,2,\cdots,n$）为两支路上每条流道的流量和长度。



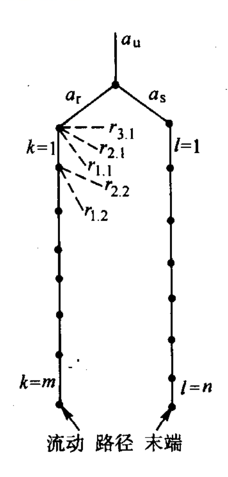


图 9.10-18　任意两流道分支的关系

利用式（9.10-5）有

$$\frac{q_r}{q_s}=\frac{a_r^3}{a_S^3} \tag{9.10-9}$$

故式（9.10-8）可改写为

$$\frac{a_r}{a_s}=\frac{L_r+\sum\limits_{k=1}^{m}\frac{q_r}{q_k}\frac{a_k^2}{a_r^2}L_k}{L_s+\sum\limits_{l=1}^{n}\frac{q_s}{q_l}\frac{a_l^2}{a_s^2}L_l} \tag{9.10-10}$$

式（9.10-10）等号右边的分子可改写成如下形式：

$$L_r+\left(\frac{q_r a_1^2}{q_1 a_r}\right)L_1+\left(\frac{q_r a_1^2}{q_1 a_r^2}\right)\left(\frac{q_1 a_2^2}{q_2 a_1^2}\right)L_2$$
$$+\left(\frac{q_r a_1^2}{q_1 a_r^2}\right)\left(\frac{q_1 a_2^2}{q_2 a_1^2}\right)\left(\frac{q_2 a_3^2}{q_3 a_2^2}\right)L_3+\cdots \tag{9.10-11}$$

又

$$\frac{q_u}{q_d}=\frac{\sum\limits_{i=1}^{d}a_i^3}{a_d^3}=1+\sum_{i=1}^{d-1}r_i \tag{9.10-12}$$

式中，d 为每个分支的流道数；u 为上游流道；$r_i=a_i^3/a_d^3$（$i=1, 2, \cdots, d-1$），并且

$$\left(\frac{a_d}{a_u}\right)^2=\left[\frac{a_d{}^3}{\sum\limits_{i=1}^{d}a_i^3}\right]^{2/3}=(1+\sum_{i=1}^{d-1}r_i)^{-2/3} \tag{9.10-13}$$

故有

$$\frac{q_u a_d{}^2}{q_d a_u{}^2}=(1+\sum_{i=1}^{d-1}r_i)^{1/3} \tag{9.10-14}$$

分别用这种方法对式（9.10-10）的分子和分母进行改写，则式（9.10-10）为

$$\frac{a_r}{a_s}=\frac{L_r+\sum\limits_{k=1}^{m}\left[\prod\limits_{j=1}^{k}(1+\sum\limits_{i=1}^{d-1}r_{i,j})^{\frac{1}{3}}\right]L_k}{L_s+\sum\limits_{l=1}^{n}\left[\prod\limits_{j=1}^{l}(1+\sum\limits_{i=1}^{d-1}r_{i,j})^{\frac{1}{3}}\right]L_l} \tag{9.10-15}$$

式中，L_i 为流道元素 i 的长度；d_j 为流道元素 j 处具有的分支数；$r_{i,j}$为比值，$r_{i,j}=a_i^3/a_j^3$，$i=1, 2, \cdots, d_j-1$（如图 9.10-17 中 $d_1=4$，$d_2=3$）。

利用式（9.10-6）和式（9.10-15），若已知流道总体积和分流道各部分长度，则可求出各流道元素的半径。用这种方法计算得到的各流道半径，在理论上能保证各分流道保持恒定的流量，并使熔体同时到达各型腔分流道的末端。这里应注意的是，式（9.10-6）和（9.10-15）与材料特性、注射速度和型腔几何形状无关，因此改变这些参数均无需对流道设计作任何修正。

例　图 9.10-19 示出一流道设计简图，其流道系统总体积为 10 cm³，分流道长度 $L_1=L_4=L_7=2$ cm，$L_2=L_3=L_5=L_6=L_8=L_9=1$ cm，试设计各分流道半径。

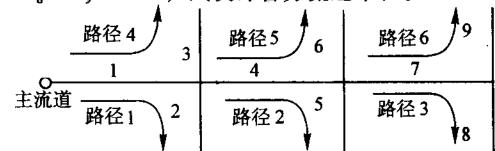


图 9.10-19　某流道设计简图

解：由式（9.10-15）可得到：

$$\frac{a_8}{a_9}=\frac{a_5}{a_6}=\frac{a_2}{a_3}=1$$

$$\frac{a_7}{a_5}=\frac{L_7+(1+1^3)^{\frac{1}{3}}L_8}{L_5}=3.26$$

$$\frac{a_4}{a_2}=\frac{L_4+(1+1^3+3.26^3)^{\frac{1}{3}}L_5}{L_2}=5.32$$

由式（9.10-6）可得到：

$$a_7^3=a_8^3+a_9^3=2a_8^3$$

$$a_4^3=a_5^3+a_6^3+a_7^3=(1^3+1^3+3.26^3)a_5^3=36.65a_5^3$$

$$a_1^3=a_2^3+a_3^3+a_4^3=(1^3+1^3+5.32^3)a_2^3=152.57a_2^3$$

利用以上 8 个方程式仍无法求解从 a_1 到 a_9 的 9 个未知数。增加流道总体积的限制方程，$V=10\ \text{cm}^3=\pi(a_1^2L_1+a_2^2L_2+a_3^2L_3+a_4^2L_4+a_5^2L_5+a_6^2L_6+a_7^2L_7+a_8^2L_8+a_9^2L_9)$

由以上方程联立求解，其结果见表 9.10-1。

表 9.10-1　　cm

单元号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
长度	2	1	1	2	1	1	2	1	1
半径	0.77	0.14	0.14	0.77	0.23	0.23	0.75	0.60	0.60

7.2.2　流道限制机构的设计计算

浇口即流道限制机构用以改变各个型腔的体积流量，使各个型腔同时被充满。

设型腔 i 的流量和体积分别为 q_i 和 V_i，型腔 j 的流量和体积分别为 q_j 和 V_j，各型腔的体积流量应有如下关系才能在理论上保证各型腔被熔体同时充满：

$$\frac{q_i}{q_j}=\frac{V_i}{V_j} \tag{9.10-16}$$

如图 9.10-20 所示，沿各流动路径的压力降应相等，故有：

$$\Delta p_{i,r}+(\text{沿流动路径 } r \text{ 的压力降})=\Delta p_{i,s}+(\text{沿流动路径 } s \text{ 的压力降}) \tag{9.10-17}$$

式中，$\Delta p_{i,r}$和 $\Delta p_{i,s}$分别为浇口 r 和浇口 s 的压力降。流道和浇口的压力降公式可根据幂律流体在圆管中的流变方程获得。

当已知所有浇口的长度以及某一浇口半径（例如，规定浇口的最小允许半径值）后，可由以上两式计算出所有浇口的半径。以这种方法算得的浇口半径在理论上能使所有型腔以同样的压力同时充满。应注意的是，式（9.10-17）与材料特性有关，故当改变塑料品种时，需要修正浇口的尺寸。

7.2.3　交互式流道设计程序简介

根据上述原理和公式，可编制初始分流道设计程序和初始浇口设计程序，再加上注射过程熔体流动模拟程序，便可构成交互式流道设计软件包，其设计流程如图 9.10-21 所示。



模具设计人员先利用模具 CAD 系统提供的交互图形功能设计出型腔几何形状，或者从其他模块中调出早已设计好的型腔形状，然后利用初始流道和浇口设计程序决定各流动路径中流道半径和浇口半径，由此获得等温状态下的流道和浇口的初始数据。利用该结果，再运行注射过程熔体流动模拟程序，视流道－浇口－型腔为一体，将非等温流动特性反映到流道和浇口设计中，通过迭代计算，修正初始设计时确定的流动路径的流道元素半径和浇口半径。

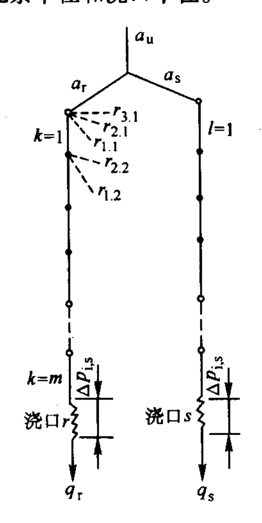


图 9.10-20　流道限制机构的设计

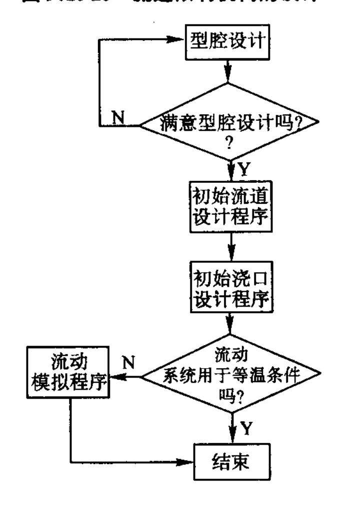


图 9.10-21　交互流道设计流程

8　冷却系统设计

冷却系统的作用是缩短模具的冷却时间，提高生产效率，还有调节和控制模温，保证成型产品质量的作用。常用的冷却方法是将水通入模具以带走热量。

计算机辅助设计系统一般提供标准的冷却水道和冷却芯设计方案，以提高模具的设计效率，同时还提供交互式水道设计环境，用于设计形状特殊的水道。除此之外，系统还提供冷却芯接口，用户可以通过该接口将自己设计的冷却芯加到系统中去。

模温的升高主要由熔融塑料所致。单位时间内熔融塑料带入模具的热量可用下式计算

$$Q = mc(T_1 - T_2)$$

式中，Q 为总热量；m 为单位时间内注入模具的塑料总质量（包含浇注系统所含塑料质量）；c 为塑料的比热容；T_1、T_2 为塑料在注入时和开模时的温度。

熔融塑料带入模具的热量除小部分通过辐射、对流扩散到空气中外，剩下的需由冷却介质带走。如用水作冷却介质，则单位时间需要的冷却水量为

$$M = \frac{\beta Q}{c_2(T_3 - T_4)}$$

式中，c_2 为水的比热容；T_3 为出水温度；T_4 为进水温度；β 为常取 0.95。

需要水道的总传热面积为：

$$A = \frac{\beta Q}{K\Delta Tt}$$

式中，K 为冷却介质对管壁的镜膜传热系数；ΔT 为模具和冷却水的平均温差，例如取 20℃；t 为冷却时间。

A 的值可用于设计水道的长度和直径，由 M 的值可得出冷却水的最小流速。一般来说，应尽量采用快速、大流量的通水冷却，因其可使模温均匀降低，冷却效果较好。

总体设计阶段确定的水道布置方案只描述了水道的种类和拓扑形状，没有水道的几何信息。在模具结构详细设计阶段，需要确定水道详细的几何信息，并将水道分段。除此之外，还要添加水道的附属零件，如出入水管接头、锥螺塞、密封垫等。图 9.10-22 为水道详细设计的流程图。

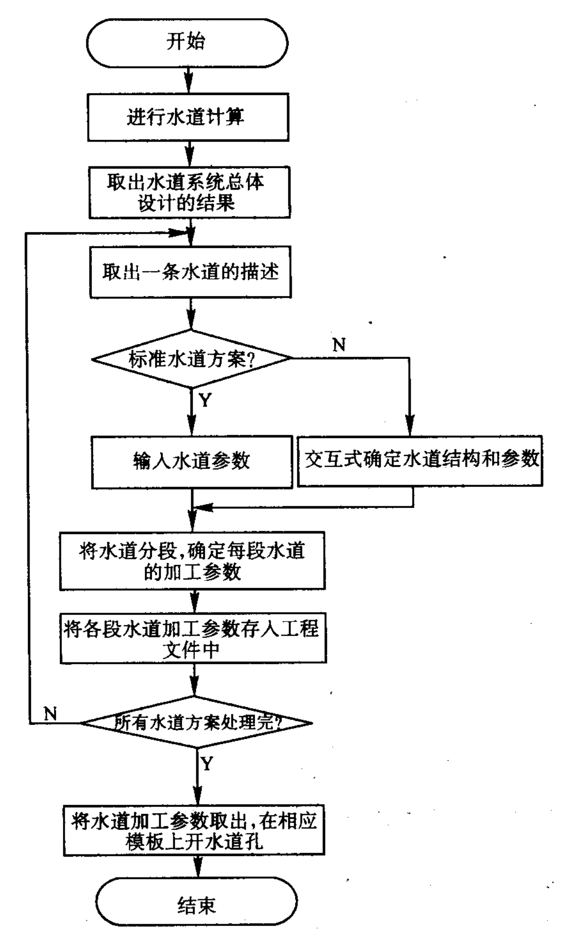


图 9.10-22　水道详细设计流程图

9　注射流动模拟

传统的注射模设计主要依赖设计者的直觉和经验，设计结果的可靠性差，难以预知可能发生的问题或缺陷，因此模具往往要经过反复调试和修改才能正式投入生产。这不仅导致了模具生产周期和新产品开发周期的延长和生产成本的增

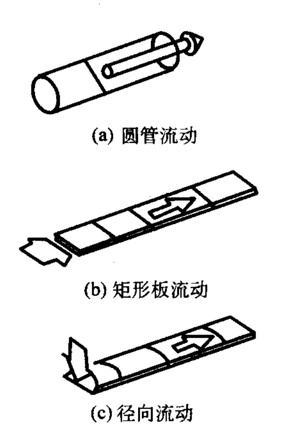
加，同时也难以保证产品的质量。

塑料成型过程的计算机模拟就是建立成型过程的数学模型，对成型过程进行分析与仿真，预测可能发生的问题与缺陷。

通过注射流动模拟可以获得型腔中塑料熔体的温度场、压力场、速度场和应力应变场，可以确定熔体的流动前沿位置、熔接纹位置和缩孔位置，为合理选择成型工艺参数和模具结构参数提供了科学依据。

9.1　一维流动模拟

如图 9.10-23 所示，注射成型一维流动的基本型式有 3 种，即圆管流动、矩形流动和径向流动。所谓一维流动，系指熔体流动的速度场可用单方向的流速来表征。圆管流动主要用来模拟熔体在流道内的流动，而矩形板和径向流动则用以模拟熔体在型腔内的流动。



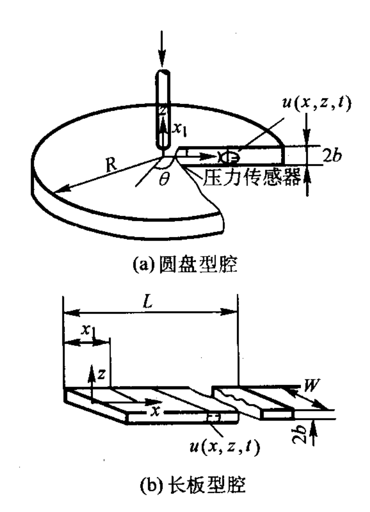
(a) 圆管流动

(b) 矩形板流动

(c) 径向流动

图 9.10-23　一维流动的三种基本型式

注射模流动模拟的一种常用方法是将三维型腔展平并分解为许多基本流动单元进行一维分析，如径向流动的基本单元是带有中心浇口的薄圆盘型腔，矩形板流动的基本单元是带有端部浇口的薄长板型腔等。如图 9.10-24 所示。



(a) 圆盘型腔

(b) 长板型腔

图 9.10-24　一维基本流动单元

当基本流动单元的类型确定后，需要建立熔体在这些基本单元内流动的数学模型，这样才能确定流动过程模拟的算法和编制程序。对于圆盘型腔和长板型腔，可以得到如下一组控制方程：

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\frac{\partial u}{\partial z}\right)-\frac{\partial P}{\partial x}=0 \tag{9.10-18}$$

$$pc_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}\right)=K\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\eta\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \tag{9.10-19}$$

$$\Gamma(x)\int_{-b}^{b}u\mathrm{d}z=Q \tag{9.10-20}$$

式中，z 为厚度方向的坐标；η 为剪切黏度；u 为 x 方向的流速；p 为型腔内压力；ρ 为密度；c_p 为比热容；T 为温度；t 为时间变量；K 为导热系数；Q 为恒定的熔体注射流量；板厚为 $2b$（从 $-b$ 到 b）。

流场的边界条件为：

当 $z=b$ 时，$u=0$；

当 $z=0$ 时，$\frac{\partial u}{\partial z}=0$。　　(9.10-21)

温度场的边界条件为：

当 $x=x_1$ 时，$T=T_e$；

当 $x=x_{int}(t)$ 时，$\partial T/\partial x=0$；　　(9.10-22)

当 $z=\pm b$ 处，$T=T_c$；

在 $z=0$ 处，$\partial T/\partial z=0$。

熔体的黏度模型采用修正的克罗斯（Cross）模型：

$$\eta(\dot{\gamma},T)=\frac{\eta_0(T)}{1+(\eta_0\dot{\gamma}/\tau^*)^{1-n}} \tag{9.10-23}$$

式中，$\eta_0(T)=B\exp(T_b/T)$　　(9.10-24)

η 为熔体的剪切黏度；η_0 为零剪切速率黏度；$\dot{\gamma}$ 为剪切速率；T 为温度；n、T_b、B、τ^* 为与塑料性质有关的四参数。

式（9.10-18）是将本构方程代入流体动力学基本方程后经简化所得。该式中忽略了惯性项 $\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}\right)$，此时可视熔体在型腔内的流动为“蠕动”。这种处理的依据是在熔体注射流动过程中雷诺数 Re 很小，一般 $Re<10^{-2}$，因此可以忽略熔体的惯性力。

式（9.10-19）由热传导的普遍微分方程简化而来。在该式中忽略了流动方向的导热，即假定 $K\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}=0$，这是因为熔体在注射流动过程中佩克莱特数 Pe 很大，一般 $Pe>10^2$（佩克莱特数 Peclet 是动量与热扩散系数的比值），故可以忽略 x 方向的热传导，认为热传导仅沿着垂直于模壁的方向（z 方向）。

式（9.10-20）为流量方程，其中 $\Gamma(x)$ 为型腔形状函数，如图 9.10-24 所示，对于圆盘型腔，$\Gamma(x)=2\pi x$，对于长板型腔，$\Gamma(x)=W$。

式（9.10-21）为流场边界条件，因熔体沿型腔厚度方向上呈对称流动，故在厚度中心处（$z=0$）有 $\partial u/\partial z=0$。

式（9.10-22）为温度场边界条件。浇口附近的温度可视为熔体的入口温度 T_e，在模壁处（$z=\pm b$），熔体温度 T 近似为模壁温度 T_c，因温度沿型腔厚度方向对称分布，故在厚度中心（$z=0$）处有 $\partial T/\partial z=0$，在熔体的流动前沿 $x=x_{int}(t)$，假定熔体热量不传至空气中，故有 $\partial T/\partial x=0$。

在数学模型中忽略了熔体的弹性，这是因为目前尚不能构造出理想的包括弹性影响的流动模型。

流动数学模型建立后便可确定数值解法。对式（9.10-18）积分，并利用式（9.10-20）和式（9.10-21），可以得到：

$$\Lambda=\frac{Q}{2\Gamma S} \tag{9.10-25}$$

式中，压力梯度

$$\Lambda\equiv-\frac{\partial p}{\partial x} \tag{9.10-26}$$

流动率

$$S\equiv\int_0^b\frac{z^2}{\eta}\mathrm{d}z \tag{9.10-27}$$

其他符号同式（9.10-20）。还可以推出如下关系式：



剪切速率

$$\dot{\gamma}=\frac{|\Lambda|z}{\eta} \qquad (9.10\text{-}28)$$

速度

$$u=\int_z^b\dot{\gamma}\,\mathrm{d}z \qquad (9.10\text{-}29)$$

黏性热

$$\phi=\eta\dot{\gamma}^2 \qquad (9.10\text{-}30)$$

计算步骤可这样安排：如果已知某一时刻的温度场 T（假定开始计算时温度场 $T=T_e$），可利用上一时刻的黏度 η 和式（9.10-27）求得流动率 S，利用式（9.10-25）求得压力梯度 Λ，从而获得该时刻的压力场。这样，便可利用式（9.10-23）、式（9.10-28）、式（9.10-30）求得该时刻的黏度 η、剪切速率 $\dot{\gamma}$ 和黏性热 ϕ，利用式（9.10-29）得到速度场 u。至此，就能利用式（9.10-19）求取下一时刻的温度场 T，依次循环下去，直至单元充满。

9.2 二维流动模拟

当建立起圆盘单元和长板单元那样的一维流动数学模型和算法后，便可按熔体的流动路径将一维流动单元组合起来分析任意形状的二维型腔内熔体的流动。这种方法需要模具设计人员事先划分出熔体的流动路径，然后再根据流动路径将型腔分解成若干串联的一维流动单元。

在这种方法中，模具型腔和流道可划分为许多基本流动单元。图 9.10-25 示出了其中四种。

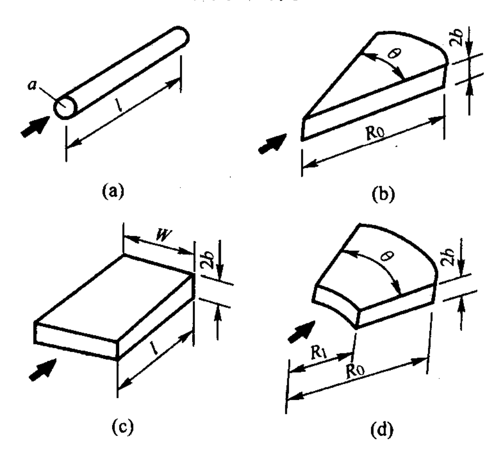


图 9.10-25 四种常用的流动单元

a）圆形管 b）具有中心浇口的圆板件
c）边缘浇口的平板 d）中心浇口圆环板

在实际应用中，还可以再增添一些其他基本单元，如梯形块、圆环管、圆锥管等。应注意的是，无论这些基本单元的形状如何变化，它们都应属于一维流动。

图 9.10-26 示出某二维型腔的九个流动单元，它们可为图 9.10-25 四种单元类型中的任意一种。通过分析不难看出，以单元 1 为入口的熔体一共有五条流动路径，它们由 1－2－9、1－3－4、1－3－5－6、1－3－5－7 及 1－3－5－8 单元组合而成。

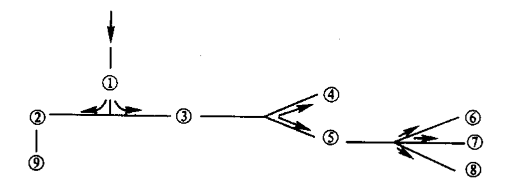


图 9.10-26 流动路径的确定及单元划分

又如图 9.10-27 示出的某一平板型腔及流道，经分析，可划分出两条流动路径。第一条路径由 1－2－3－4－5 单元组成，第二条路径由 1－2－6－7－8－9 单元组成。从图中可知，这九个单元分别属于圆形管、圆板、圆环板和平板单元。

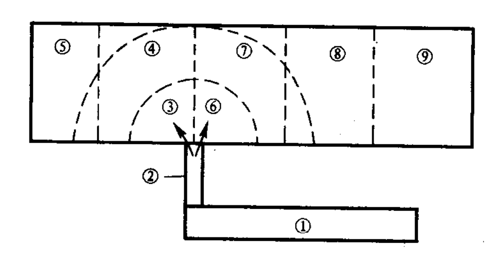


图 9.10-27 平板型腔的分解

当确定好流动路径和流动单元后，便可借助二维流动分析程序来模拟熔体在型腔内的流动，获得任一时刻熔体流动的前沿位置及其温度场、速度场、压力场、熔合纹位置等。二维程序基于一维分析，其主要步骤如下。

1）由于注射流动是一个非稳态过程，因此在流动分析时应分别考虑每一个时间步长。名义时间步长 $\Delta t=t_{充满}/NM$（$t_{充满}$ 为假定的型腔充满时间，NM 是人为取定的时间间隔数）。因为是用一维流动单元的串联组合来分析二维流动，所以不希望在某一时间步长的计算中涉及到两个流动单元，也就是说，在某一个时间步长内只考虑在一个单元内的一维流动，当出现某单元在一个时间步长的中间被充满时，应根据该单元的充满时间调整该次的时间步长。

2）若在某单元内熔体的流动尚未停止，则在每个时间步长内都应更新该单元的温度场。

3）因为每条流动路径的入口压力近似相等（浇口处压力），末端压力皆为大气压力，所以在任一时刻每条流动路径的总压力降应该相等。根据这一物理条件，利用迭代法在每一时间步长内沿每条流动路径更新其体积流量 $Q_{支}(I)$（$I=1, 2, \cdots, NN$，NN 为总流动路径数）。但若在流动过程中其流动路径的最后一个单元已全部充满，在后续的时间步长内再没有熔体流入该路径，从此时起应置该流动路径的体积流量为零。

4）根据更新后的体积流量，计算熔体在每一个未充满单元内的前沿位置。

5）根据一维流动分析中所介绍的计算步骤计算单元内的压力场和速度场等。

6）返回到步骤 2），重复计算过程，直至全部流动路径内的单元均被熔体充满为止。

9.3 三维流动模拟

对任意形状的三维制件，为了获得充模流动时的速度场、压力场和温度场，应进行三维流动模拟。由于三维流动模拟的复杂性，目前主要采用两种简化方法。

（1）流动路径法

流动路径法是以一维流动分析为基础，先构造若干种一维流动单元，如图 9.10-25 所示的单元。分析前，将三维制件展平成二维形状，并将上述一维流动分析单元进行“形状组合”，即用一系列一维流动单元近似描述展平后的制件形状，得到一组流动路径，每条流动路径由若干一维流动单元串联而成。在分析过程中，通过迭代计算，在满足各流动路径的流量之和等于总的注射流量的条件下，使各流动路径的压力降相等，其算法的主要步骤如图 9.10-28 所示。



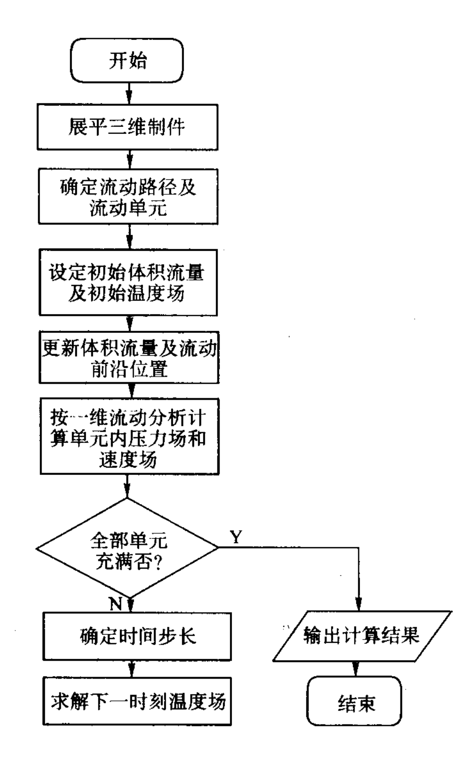


图 9.10-28　流动路径法的计算流程图

在计算过程中，对于体积流量的更新，当某一流动路径的最后一个单元已全部被熔体充满，在后续的时间步长内再没有熔体流入该路径，从此时起，应置该流动路径的体积流量为零。对于时间步长的确定，时间步长应小于单元的充满时间。当出现某单元在一时间步长的中间被充满时，应根据该单元的充满时间调整该次的时间步长。

流动路径法将三维问题简化为二维问题，当人为地确定好流动路径和流动单元后，便可采用基于一维流动分析程序来模拟熔体在型腔内的流动，获得任一时刻熔体流动前沿位置及其温度场、压力场、速度场等，这种方法简单，所需计算时间短，适合于空腔薄壁制件，但难以分析形状复杂的制件。在对展平后的制件进行形状组合的过程中，往往要靠分析人员和模具设计人员的经验，数据准备工作量也很大。图 9.10-29 表示了某塑料制品的平面展开图及其流动路径和单元的设置。

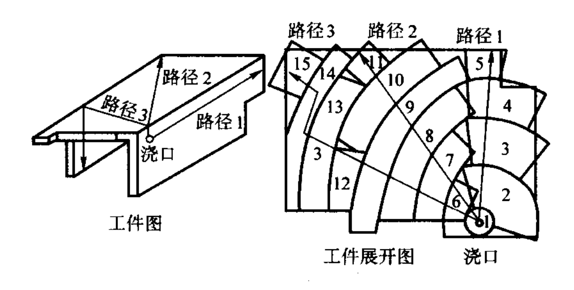


图 9.10-29　制品展开及流动路径、流动单元的设定

(2) 有限元与有限差分混合法

这种方法沿用前面所介绍的二维流动模型，其求解过程与二维相同，用有限元法计算熔体的压力场，有限元与有限差分混合法计算温度场。但在确定熔体流动前沿位置时采用了控制体积法（Control Volume Scheme)。所谓控制体积，是指由一定厚度的有限元网格得到的多边形体积。在图 9.10-30 所示的具有一定厚度的三角形网格中，连接三角形重心和各边中点便构成了多边形控制体积，如图中阴影构成的区域所示。从图 9.10-30 可知，每一个三角形单元的内部节点均被一个多边形控制体积所围绕。在实施过程中，对每个控制体积引入系数 f，$f=V_m/V$（式中 V_m 为控制体被熔体充填部分的体积，V 为控制体的体积）。

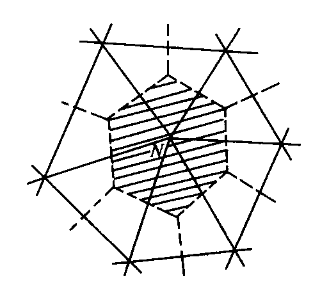


图 9.10-30　多边形控制体积的形成

f 的大小反映了控制体的充满程度。显然，对已被熔体充满的控制体积，$f=1$；对熔体尚未流入的控制体积，$f=0$；对尚未被熔体完全充满的控制体积 $0<f<1$，如图 9.10-31 所示。根据当前时刻的压力场，如果已知哪些控制体积为前沿控制体积，就能根据流量计算每一个前沿控制体积需要充满的时间，取最短的充满时间为当前时间步长，则在下一时刻，必有一个前沿控制体积被熔体充满，与其相邻的各个控制体积将变为新的前沿控制体积，如此进行下去，直至整个型腔被熔体完全充满。这种方法在计算过程中流动前沿位置自动更新，不需人工干预，计算精度高，被很多商品化流动分析软件所采用。

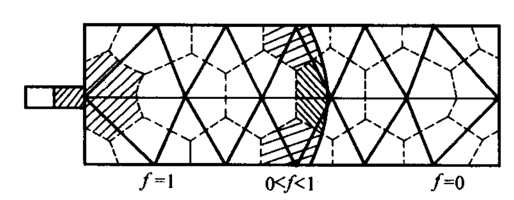


图 9.10-31　控制体积充填状况示意图

10　冷却过程分析

在注射模设计过程中，模具设计人员往往把注意力集中在流道系统和顶出系统，事先对注射模的冷却系统重视不够，这将导致冷却管道最终只能沿模具空余空间布置。这种轻视冷却的设计过程是不合理的，原因是注射成型周期主要取决于冷却时间。据统计，注射成型周期中有 5% 的时间用于注射成型，15% 的时间用于顶出，而 80% 的时间用于冷却。由此可见，注射模冷却系统的设置直接影响到注射制品的生产效率和质量。

衡量注射模冷却系统优劣的标准有两条，第一是使注射模冷却时间最短，第二是使注射制品表面温度均匀，以减小制品的变形。

影响注射模冷却系统的因素是多方面的，除了注射制品的几何形状、冷却介质、流速、温度、冷却管道的布置、模具材料、熔体温度、工件顶出温度、模具温度外，还涉及到塑料和模具之间非稳态热循环交互作用。用实验的方法来测试不同冷却系统对冷却时间和制品质量的影响是相当困难的，而计算机模拟则是完成这种预测的最佳方法。

考虑到全部影响因素和热现象的冷却系统模拟程序在原则上是能够实现的，但计算费用极其昂贵。在实际应用时，可以从制品形状和冷却条件这两个方面进行简化，如用一维或二维分析代替三维分析，用稳态温度场代替非稳态温度变化。

10.1 冷却分析的数学模型

(1) 热传导微分方程

对于均质各向同性材料且没有内热源的热传导偏微分方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\lambda}{\rho c_p}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{9.10-31}$$

稳态时上述方程成为拉普拉斯（Laplace）方程

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}=0 \tag{9.10-32}$$

(2) 边界条件

求解拉普拉斯方程需要给出边界条件，才能确定惟一的一组解，边界条件描述区域边界上的温度或热流量，一般有以下三类边界条件。

1) 第一类边界条件，也称 Dirichlet 条件，给出导热物体边界上各点的温度值。例如模具与空气接触，其接触部分温度恒定且等于大气温度 T_0，即 $T=T_0$。

2) 第二类边界条件，也称 Neuman 条件，给出物体边界上的热流量。如在模具的对称面上，热流量为零，即温度的法向梯度$\frac{\partial T}{\partial n}=0$。

3) 第三类边界条件，也称 Robin 条件，给出物体边界上各点温度与热流量的线性组合。例如对流换热边界

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}=K(T-T_0) \tag{9.10-33}$$

式中，λ 为模具材料的热导率；h 为传热系数，此时应分三种情况。

① 模具与空气的边界，上式 T_0 为环境温度，K 为模具与空气单位面积上的传热系数。

② 模具与冷却管道边界，T_0 取为冷却水的温度，K 为模具与冷却水单位面积上的传热系数。

③ 模具与塑料边界，T_0 取为塑料制品冷却前的初始温度，K 为模具与塑料之间单位面积上的传热系数，这时 K 应取为塑料制品与模壁之间的热传递在一个冷却周期内的平均值。

基于热传导微分方程，对于具体的实际问题，根据不同的模具几何形状和计算精度要求，可分别建立注射模冷却系统的一维冷却模型、二维冷却模型，三维冷却模型进行模拟。

10.2 一维冷却分析

当模具几何形状简单，热量只沿一个方向流动，如平板、圆筒形状，温度仅沿模壁方向变化，可建立一维冷却模型进行一维冷却分析。

1) 一维稳态热传导微分方程为

$$\frac{d^2 T}{dx^2}=0 \tag{9.10-34}$$

2) 求解过程 对于式（9.10-34）积分两次可得

$$T=c_1x+c_2 \tag{9.10-35}$$

该式表明，此时平板内的温度分布为直线规律。积分常数 c_1 和 c_2 可由给定的边界条件确定。当 $x=0$ 时，$T=T_1$，T_1 为型腔内壁的温度，取为塑料制品的初始冷却温度，$x=b$ 时，$T=T_2$，T_2 为型腔外壁的温度，取为大气温度，则可得积分常数，代入上式，平板壁厚方向温度分布为

$$T=\frac{T_2-T_1}{b}x+T_1 \tag{9.10-36}$$

需指出的是，式（9.10-36）仅给出模壁厚度方向的温度分布，据此无法设计冷却系统。在实际的冷却分析中，对于如图 9.10-32 的具有简单扁平形状的大型注射模型腔，常采用等间距布置冷却管道的冷却系统，若型腔壁很长，假设熔体在模腔之间的热传递仅沿模壁方向进行，这样可用管边距 a 和管间距 b 确定冷却系统。a、b 可用下列公式迭代求解确定

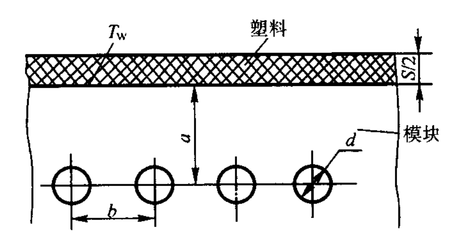


图 9.10-32 一维冷却模型示意图

T_w—模具型腔壁的平均温度

$$J=2.4\left(\frac{K_c d}{\lambda_w}\right)^{0.22}\left(\frac{b}{a}\right)^{2.8}\ln\left|\frac{b}{a}\right| \tag{9.10-37}$$

$$Q=\frac{0.87\ (T_w-T_c)\ \lambda_w K_c d}{0.87\lambda_w+K_c d\ [a-0.13\ (\pi d-b)]}$$

式中，J 为冷却管道中允许的温度波动率，对非结晶塑料 $J\leqslant 5\%$，对结晶塑料 $J\leqslant 2.5\%$；λ_w 为模具材料的热导率；K_c 为模具与冷却介质间的对流传热系数；T_w 为模具型腔壁的平均温度；T_c 为冷却水的平均温度；Q 为冷却水应带走的热量，可根据模具的热平衡分析得到。

迭代求解时，选定 b/a 的一个最大值，然后依次减小，直至 J 达到允许的温度波动率为止，得到 b/a。设定 a 的一个最小值，计算 Q，与需要由冷却水带走的热量相比较，逐次增加 a，直至两者的热量值接近，这样就求得了管边距 a 与管间距 b。

显然，一维冷却分析算法简单，程序易于编写，使用方便，但仅适合于简单的塑料制品。

10.3 二维冷却分析

对于平直的注射制品，可用一维分析中的两参数 a 和 b 来确定冷却管道的布置。但大多数制品均具有复杂的形状，不能仅用 a、b 两参数来确定冷却管道，此时可以利用二维分析方法对模具的典型截面上的冷却情况进行分析。

由于在注射循环过程中非稳态的温度变化幅度较小，且主要表现在模具型腔表面，在一般情况下可以忽略温度的这种周期性变化，将注射模的冷却假定为稳态热传导问题，此时二维热传导方程可归结为拉普拉斯方程：

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}=0,\qquad x\in\Omega \tag{9.10-38}$$

边界条件为：

$$T=\overline{T},\ x\in S_1$$

$$\frac{\partial T}{\partial n}=\frac{\overline{\partial T}}{\partial n},\ x\in S_2$$

$$-K\frac{\partial T}{\partial n}=h(T-T_0),x\in S_3 \tag{9.10-39}$$

式中，S_1、S_2、S_3 分别对应不同的边界条件。例如，模具与空气接触的部分属于 S_1，此时可以认为模具与空气接触的外壁温度是恒定的，且等于大气温度 $\overline{T}$。边界条件 S_2 常用于具有对称面的模具。此时，因对称性仅分析模具的一半，模具的对称面便成其为模具边界的一部分。在对称面上的热流量为零，即温度的法向梯度$\frac{\partial T}{\partial n}=0$，故对称面边界条件为$\frac{\partial T}{\partial n}=\frac{\overline{\partial T}}{\partial n}=0$。$h$ 和 T_0 分别对应如下三种情况。

1) 模具与空气的边界。此时 h 为模具与环境温度 T_0 之间的空气热传导系数。

2）模具与冷却管道的边界。此时 h 为冷却介质的界膜热传导系数，T_0 为冷却介质的温度。

在冷却管道内作湍流流动的冷却介质的界膜热传导系数可采用如下经验公式：

$$h_C = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{K_C}{d} \tag{9.10-40}$$

式中，K_C 为冷却介质的热传导率，单位为 J/（s·°C·cm）；h_C 的单位为 J/（s·°C·cm²）；d 为冷却管道直径；Re 为雷诺数；Pr 为普兰特数。Re，Pr 分别为：

$$Re = \frac{4\rho_C \dot{V}_C}{\pi \mu_C d}$$

$$Pr = \frac{C_C \mu_C}{K_C}$$

式中，μ_C 为冷却介质的黏度，单位为 g·s/cm²；$\dot{V}_c$ 为冷却介质的流量，单位为 cm³/s。

3）塑料与模壁的边界　此时 h 为塑料与模壁之间的热传导系数，T_0 为塑料制品冷却前的初始温度。系数 h 可定义为：

$$h(t_C) = \frac{\int_0^{t_c} q(t)\mathrm{d}t}{t_C(T_0 - T_W)} \tag{9.10-41}$$

式中，$q(t)$为随时间变化的塑料制品的热流量；t_C 为从初始温度 T_0 到模壁温度 T_W 所需的冷却时间，它们均可从一维非稳态热传导的理论解推得。从式（9.10-41）可以看出，$h(t_C)$是模壁与制品之间的热传递在一个冷却周期内的平均值。

式（9.10-38）可用有限元法或边界元法求解。例如，采用边界元法，可根据格林第二定律将式（9.10-38）中的微分形式转换成积分方程：

$$\alpha T(x) = \int_S \left(T\frac{\partial \ln r}{\partial n} - \ln r \frac{\partial T}{\partial n} \right) \mathrm{d}S \tag{9.10-42}$$

式中，$r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$，（$x$，$y$）为 x 的坐标，（ξ，η）为 x' 的坐标，如图9.10-33所示。α 为在给定点处表面所形成的内角，在二维情况时，若点在区域内，则 $\alpha = 2\pi$，若点在平滑的边界上，则 $\alpha = \pi$。

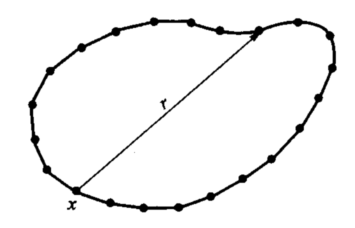


图9.10-33　二维分析时边界元平面

如图9.10-33所示，应用式（9.10-42）于边界上的每一个单元，可以获得一组线性代数方程：

$$[A]\{X\} = \{f\} \tag{9.10-43}$$

在式（9.10-43）中要包括全部边界条件，其中 $\{X\}$ 为边界单元的未知温度 T 或者未知温度梯度$\frac{\partial T}{\partial n}$，它们可以利用数值解法求得。

以上问题同样可用有限元法求解。与有限元法比较，边界元法最大的优点在于仅需离散二维截面的边界，而不是整个区域。这样，当修改模具内冷却管道尺寸和位置以便进行多个冷却方案比较时，无需重新划分边界元网格，节省了运算时间。

10.4　三维冷却分析

注射模的许多冷却系统是无法用典型截面上的冷却管道来近似的，此时需要采用三维冷却分析。三维冷却分析的原理和方法与二维雷同。例如，当采用边界元法时，可将三维空间的拉普拉斯方程 $\nabla^2 T = 0$ 转换成如下积分方程：

$$\alpha T(x) = \int_S \left[\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial n} - T\frac{\partial(1/r)}{\partial n} \right] \mathrm{d}S \tag{9.10-44}$$

式中，在光滑表面 $\alpha = 2\pi$，对任意内点 $\alpha = 4\pi$，$r = \sqrt{(x-\zeta)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}$，（$x$，$y$，$z$）为 x 的坐标，如图9.10-34所示。

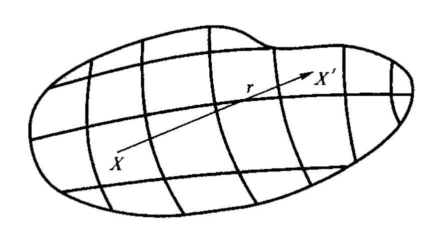


图9.10-34　三维分析时边界元表面

在三维分析时，采用边界元法的优点是能将三维问题化为二维表面网格问题处理，这样就有可能与三维注射流动分析共用同一几何模型，简化几何数据输入的工作量。但是在三维分析时采用边界元方法却面临如下两方面的困难：

1）模具结构尺寸比例相差悬殊，例如，模具外表面比冷却管道表面尺寸大得多，管道本身长度又比直径尺寸大，型腔厚度和长度相差也很大，除非将单元划分得很细，否则边界元法无法适应单元尺寸的这种大幅度变化；

2）冷却管道很长，离散管道圆周至少需要8个单元，这样当管道表面网格化时就会产生大量的单元，致使计算量过大。

解决以上困难的途径如下。

1）用型腔的中性面来取代型腔的上、下表面，这种处理方法是和注射流动分析时所采用的方法相一致的。

2）避免沿管道表面划分网格，这是因为我们对冷却管道的温度场并无兴趣，故可忽略不计沿管道圆周的温度变化。这样，每一个管道的圆面积均可用其圆心代替，三维管道问题就能用沿管道轴向的一维离散表示。

当对精密注射模的冷却系统作精确分析时，则需要考虑冷却时的非稳态特性。非稳态问题比稳态问题复杂得多，在实现方法上需要采用必要的简化措施。例如有些软件在作非稳态冷却分析时，将工件简化为一维非稳态冷却问题，用有限差分法将工件沿厚度分层处理，用三维边界元方法求解模具内温度场，用半经验方法处理冷却管道冷却，再将这三类公式有机地结合在一起处理冷却系统的非稳态冷却。

编写：李志刚（华中科技大学）

第 11 章　锻　模　CAD

随着计算机技术的发展，计算机在锻造中的应用也不断增长。自 20 世纪 70 年代以来，国内外许多单位对锻模 CAD/CAM 进行了广泛研究。在几何造型、工艺过程设计、金属流动模拟和锻模设计等方面取得了一系列成果，为提高锻模设计和制造的效率、质量和降低成本开拓了一条新的途径。

1　利用成组技术建立锻模 CAD 系统的方法

成组技样（Group Technology，简称 GT）是在零件分类的基础上，按照其结构和加工工艺的相似性来组织生产的。利用成组技术有利于工序的优化设计，有利于扩大加工设备的使用范围，提高设备使用效率和降低生产成本，促进生产工艺的标准化和规范化，为 CAD/CAM 奠定基础。

计算机辅助设计由于自身的特点，要求采用系统的、定量的设计方法。在锻件生产中，多品种、小批量的生产占多数，并且缺乏系统的、定量的设计方法。这种情况阻碍了锻模 CAD 系统的建立。成组技术是解决这一矛盾的有效途径。利用成组技术可针对不同种类锻件的工艺过程和锻模设计的特点，建立相应的锻模 CAD 系统。

成组技术用于锻造生产，就是按照锻件形状、尺寸和材料的不同，将锻件进行分类，根据各类锻件的不同特点采用不同的生产工艺和模具设计方法。成组技术有利于建立系统的设计方法，有助于以定量的方式表达现有的设计经验。设计锻模时，可以采用与锻件相对应的系统化、公式化的设计准则。这样，在现有的技术发展水平上，利用成组技术就使得锻模 CAD 系统较易建立。

锻模的标准化是建立锻模 CAD 系统的一个重要问题。在 CAD 系统中，利用存储在计算机中的标准模具结构和模具零件信息，可提高系统的自动化程度，简化设计过程。成组技术就是在零件分类的基础上，采用相类似的加工方法及加工设备。因此，可根据锻件形状和工艺的相似性，使锻模标准化和系列化。在设计锻模时，同组内的不同锻件，利用标准化的模具结构，仅需对少数模具零件（如模芯零件）进行设计，其他零件可直接调用。图 9.11-1 为一种具有单模芯的标准模具结构。

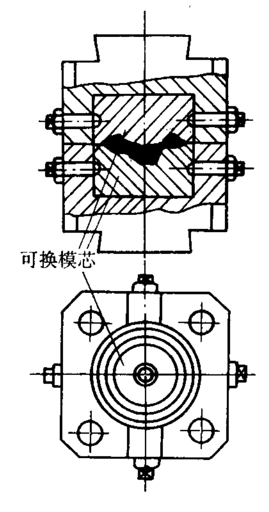


图 9.11-1　一种具有单模芯的标准模具结构

锻件的锻造工艺取决于它的形状、尺寸和材料。另外，生产批量和工厂现有设备也是考虑的因素。例如，小批量生产时，使用预锻模是不经济的，这时可采用胎模锻预成形，甚至取消预成形工序。对于一个工厂，可利用的设备总是有限的。利用成组技术可为每类锻件制定出一系列的标准工序组合，最终按生产批量和经济性等因素选定具体工序。这种方法有助于锻造工艺过程的优化设计。

总之，锻件的合理分类为锻模 CAD/CAM 奠定了基础。以成组技术为基础的锻模 CAD/CAM 系统可用图 9.11-2 表示。

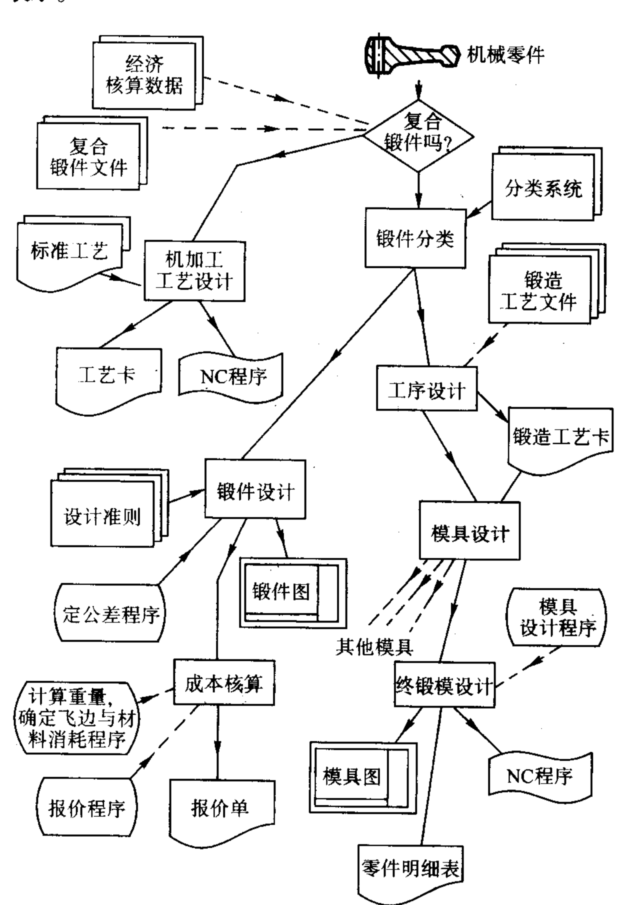


图 9.11-2　以成组技术为基础的锻模 CAD/CAM 系统

在图示的系统中，首先输入有关机械零件的信息，接着决定零件是否可用已有的标准复合锻件加工。如果可以，就不必再进行锻件和锻模的设计，可直接输出工艺卡和 NC 程序。如果需要设计新锻件，首先确定其类别，再根据类别进行锻件设计和模锻工序的设计。设计模具时，按锻件类别调用相应的设计方法。设计的模具可以包括制坯模、预锻模、终锻模和切边模等。最后，输出锻模的零件图、装配图、零件明细表和 NC 程序。如果需要，系统还可以估算成本，输出报价单。

完成图 9.11-2 所示的系统需要做大量的研制工作。为此，可先分别建立适用于不同类别锻件的 CAD 分系统。这些分系统只能应用于一定类别的锻件。在此基础上将各个分系统结合起来，形成应用范围更广的系统。

应用成组技术的关键是对零件分类编码，目前已提出许多锻件分类编码方法。大多数的锻件分类方法是以锻件的形

状和各部分的尺寸比例关系作为分类标准。图 9.11-3 所示的分类方法中，锻件分为三大类。第一类为密集形锻件，这类锻件在三个方向上的主要尺寸近似相等，即 $l\approx b\approx h$。第二类为盘形锻件，这类锻件在两个方向上的尺寸近似相等，而且大于第三个方向（高度方向）的尺寸。第三类为长杆形锻件，其显著特点是一个方向上的尺寸远大于另外两个方向上的尺寸。根据主要形状元素是否弯曲或在几个平面内弯曲，以及是否具有附加形状元素，各类锻件又可分为组和子组。

上述分类中未考虑锻件的材料和尺寸大小。图 9.11-4

第一类 密集形 $l\approx b\approx h$	组 \ 子组	101	102	103	104	
第二类 盘形 $l\approx b>h$	组 \ 子组	无轮毂和凸缘	带轮毂	带轮毂和孔	带凸缘	带凸缘和轮毂
	21	211	212	213	214	215
	22		222	223	224	225
第三类 长杆形 $l>b\geqslant h$	组 \ 子组	无枝芽	带有与主轴平行的枝芽	带 X 形的	带不对称枝芽	带两个以上枝芽
1. $l>3b$	直杆类 31	311	312	313	314	315
2. $l=(3\sim8)b$	一个方向为曲线的长杆类 32	321	322	323	324	325
3. $l=(8\sim16)b$ 4. $l>16b$	几个方向为曲线的长杆类 33	331	332	333	334	335

图 9.11-3　按形状和尺寸关系分类的方法

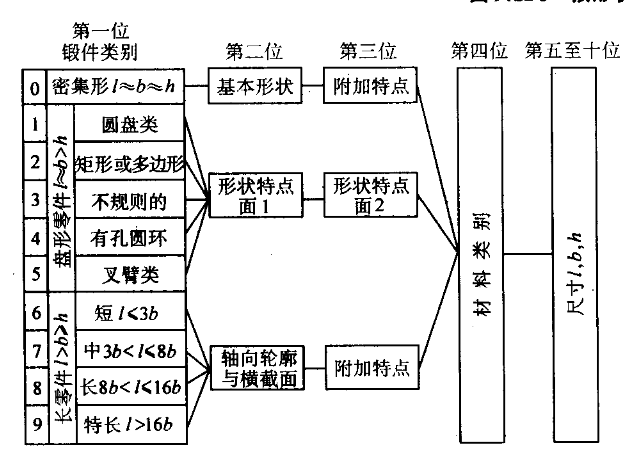


图 9.11-4　锻件分类的编码方法

所示的分类方法保持了上述分类标准的特点，还包含了材料和尺寸大小等因素。在这种分类方法中，锻件的分类可用 10 位数字编码表示。前三位数字表示了锻件的形状特点。锻件的三个基本类别，即密集类、盘类和长杆类，用第一位数字表示。数值 0 ~ 9 表示了锻件的主要特征或尺寸比例关系。第二位数字表示同一类锻件的基本特点，例如长杆类锻件的轴线弯曲方向与横截面形状。第三位数字用以描述锻件形状的一些附加特征。这些附加特征往往是很重要的。对于密集类锻件凸起或压凹的位置与方向决定着分模面位置和工步数。又如长杆类锻件的突起、孔等附加形状的对称性及其与弯曲平面的关系是确定工艺和设计模具时必须考虑的因素。第四位数字表示锻件的材料。在此编码系统中将锻件材料分为十大类，分别用 0 ~ 9 表示。锻件的长、宽、高方向的尺寸用第 5 ~ 10 位数字表示。采用这种锻件分类方法可使锻造工艺的设计合理化，便于锻模 CAD/CAM 系统的建立。

图 9.11-5 为按上述规则对锻件编码分类的一个例子。

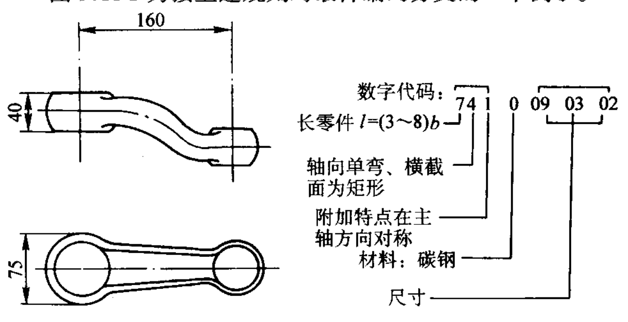


图 9.11-5　锻件编码实例

2 锻件与毛坯形状复杂性的定量计算

计算机辅助设计时，由于机器对锻件的形状特点缺乏直观感觉，因此有必要制订定量计算形状复杂性的标准。只有如此，才能导出计算模锻工艺过程主要参数的算法。例如，在计算飞边槽桥部尺寸和金属消耗的算法中，锻件的形状复杂性系数是计算公式中的主要变量。所以，在锻模计算机辅助设计中，形状复杂性的定量计算是很重要的。

人们在研究锻件形状复杂性标准时，提出了各种不同的算法。有的算法用锻件的平均高度与锻件最大直径的比值表示形状复杂性。有的算法则利用锻件最大直径的平方与平均直径的平方之比来计算形状复杂性系数。实践证明，用这些计算方法得到的结果均不够理想，因而不能在锻模计算机辅助设计的算法中使用。

模锻工艺过程设计的主要目的是保证金属在模具中的合理流动，得到无缺陷的锻件。金属流动受锻件形状的影响很大。一般说来，形状简单的锻件较易锻造，形状复杂的锻件，如长而细或分枝、凸起较多的锻件，则较难锻造。这是因为形状复杂的锻件的表面积与体积之比较大，形状的变化影响着摩擦作用和温度的变化，从而影响充满型槽所需的压力。基于这些考虑，捷捷林提出了如下计算锻件形状复杂性系数的算法。

为了计算轴对称锻件的形状复杂性系数，定义了轴向形状系数 α：

$$\alpha = X_f / X_c \tag{9.11-1}$$

而 $X_f = P^2/F$，$X_c = P_c^2/F_c$

式中，P 为锻件轴截面的周长；F 为锻件轴截面的面积；P_c 为轴截面包络矩形的周长；F_c 为轴截面包络矩形的面积。

因为上式用到的包络矩形也就是锻件包络圆柱体的轴截面，所以 α 的值实际上代表了锻件形状与圆柱体形状的差别。

对于轴对称锻件，凸起部分与对称轴的距离愈远，则锻造的困难愈大。为此定义了横向形状系数 β：

$$\beta = 2R_g / R_c \tag{9.11-2}$$

式中，R_g 为半轴截面的重心与对称轴之间的距离；R_c 为锻件的最大半径（图 9.11-6）。

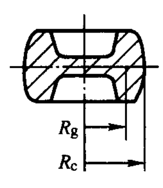


图 9.11-6 锻件的轴截面

锻件的形状复杂系数 S_F 可用下式计算

$$S_F = \alpha\beta \tag{9.11-3}$$

如果锻件为圆柱体，按上式算得的 S_F 等于 1。锻件的形状愈复杂，愈难锻造，S_F 的值也愈大。

毛坯或预锻件的形状复杂性系数 S_P 也可用相同的方法求得。因为预锻件的形状和所要求的锻件形状愈接近，终锻愈容易进行。所以，在考虑了毛坯形状的影响因素之后，综合形状复杂性系数为

$$S = S_F / S_P \tag{9.11-4}$$

对于直长杆类锻件的横截面形状复杂性系数 C_F，捷捷林建议用下式计算（图 9.11-7）

$$C_F = \frac{P}{\sqrt{F}} \times \frac{L}{0.5B} \tag{9.11-5}$$

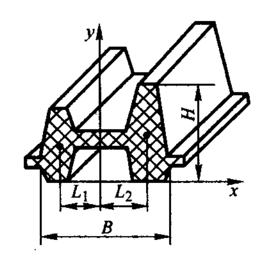


图 9.11-7 直长杆类锻件的横截面

式中，P 为锻件横截面周长；F 为锻件横截面面积；B 为锻件横截面宽度；L 为max(L_1，L_2)，L_1、L_2 分别为截面的左部和右部重心与 y 轴的距离。

同样地，考虑了毛坯的形状影响之后，综合形状复杂性系数为

$$C = C_F / C_P \tag{9.11-6}$$

式中，C_P 为毛坯的形状复杂性系数，采用与计算 C_F 类似的公式计算。

上述形状复杂性系数的计算公式已为不少锻件 CAD 系统所采用。许多研究者指出，虽然这些公式最初仅用于轴对称锻件，但它也可用于任意形状的锻件。为此，必须确定锻件所有截面的形状复杂性系数，把其中最大者当作锻件的形状复杂性系数。

3 锻件毛坯形状优化设计方法

锻件根据其所需成形工序数量的不同，可分为单工序锻件、两工序锻件及多工序锻件。对于单工序锻件，其形状一般都相对简单，成形仅由一个工序就可以完成。但是，由于其成形仅由一个工序来完成，终锻模具的形状是确定的，所以其毛坯形状就成为影响最终锻件质量的一个重要因素。如何选择合适的毛坯形状就成为单工序锻件形状优化的一个重要内容。

毛坯形状的优化可以分为两种情况。一种是单纯意义上的毛坯形状优化。这种情况下，按照体积相等原则，毛坯的体积应与锻件的体积相等（不考虑加工余量和热损耗），这就意味着对于某一个具体问题，毛坯体积是一个常量。当锻件的毛坯形状为圆柱体毛坯或矩形截面毛坯时，圆柱体毛坯或矩形截面毛坯的形状在体积一定的情况下可由其高径比或高宽比惟一确定，所以可转化为以毛坯高径比或高度比为单一优化变量的一维搜索问题。另一种是实际意义上的毛坯形状优化。这种情况是由生产实际决定的。对于轴对称锻件来说，实际所用的坯料多是圆柱体棒料，而圆柱体棒料的尺寸是由国家标准确定的，与理想锻件所要求的毛坯尺寸会有一定的差距，有时不能满足锻造工艺的要求。常用的解决办法是将标准尺寸的棒料进行镦粗以达到工艺要求的尺寸。而对于镦粗工艺，其压下量的大小是决定其锻件形状及尺寸的主要影响因素，因而，这种情况可转化为以镦粗压下量为单一优化设计变量的一维搜索问题。

由上述分析可知，无论是哪一种情况，毛坯形状的优化都可以转化为单一优化设计变量的一维搜索问题。

3.1 目标函数与优化方法

对于二维成形问题，假设 G 表示对应于任意一个实际坯料尺寸取得的最终成形件的形状，G'表示模具的形状，L 表示锻件形状的理想边界直线。由于实际锻件未充满整个模具型腔，所以在锻件理想形状边界直线 L 外形成了超出部分，即飞边 A。优化设计目标就是通过设计毛坯的高径比（高宽比）或镦粗的压下量使实际工件形状超出理想边界直

线部分的体积（如图 9.11-8 中阴影部分 A 所示）最小，从而由体积不变原理可知模具型腔的充填情况最好。所以，以超出部分的体积作为优化毛坯形状问题的目标函数。对于二维问题，目标函数有以下两种情况。

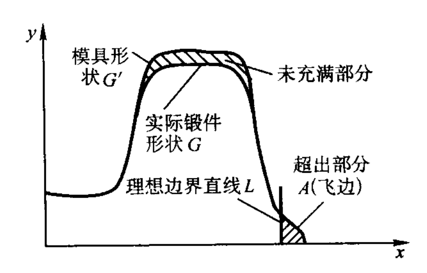


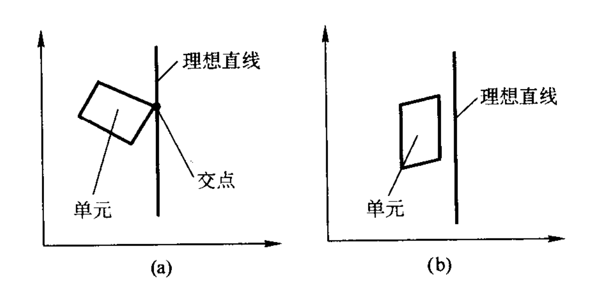
图 9.11-8　目标函数简图

3.1.1　平面应变问题

在平面应变条件下，实际上仅考虑其截面。目标函数为图 9.11-8 中超出部分 A 的面积。欲计算超出部分 A 的面积，首先需要判断预定理想直线与各个单元之间的关系，然后才能准确地计算出超出部分的面积。按照理想直线和单元之间的位置，其关系可分为以下三类。

(1) 整个单元位于直线之内

如图 9.11-9 所示。虽然这种情况下单元和理想直线仍可能会有一个或两个交点，但交点都位于单元边上，因而不会对超出部分造成影响，所以可以直接略过这些单元而不必计算其面积。



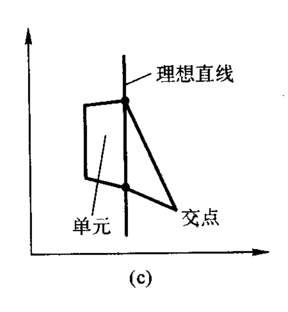


图 9.11-9　单元位于理想直线之内的情况

(2) 整个单元位于直线之外

如图 9.11-10 所示。同第一种情况类似，单元和直线之间仍会有一个或两个交点，但交点同样都是位于单元的边上，所以在计算超出部分的面积时可以直接计算整个单元的面积。

(3) 单元和直线相交

如图 9.11-11 所示。此时，按照单元位于直线之外部分（图中阴影部分）的形状，又可以细分成四边形、三角形和五边形三种情况。无论是哪种情况，在计算面积之前，都需要求出单元与直线交点的坐标，然后再进行计算。

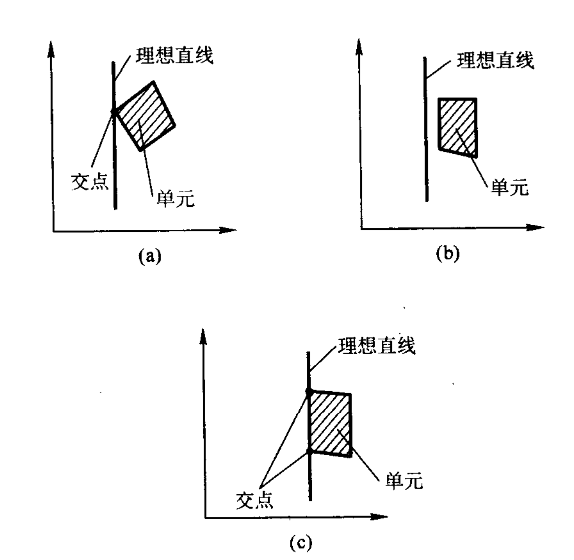


图 9.11-10　单元位于理想直线之外的情况

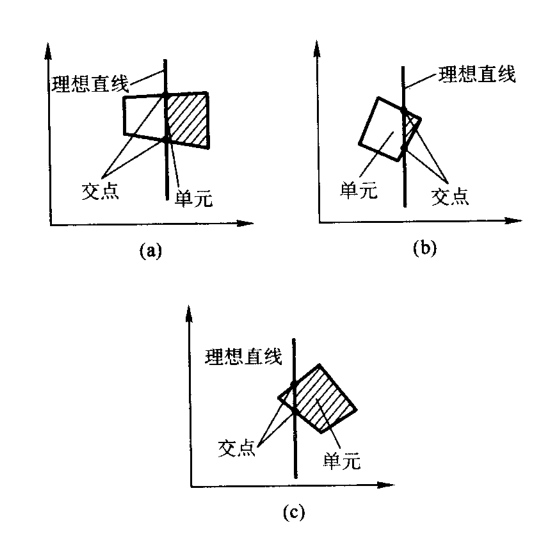


图 9.11-11　单元和直线相交的情况

1) 四边形。如图 9.11-11a 所示，首先按逆时针顺序把两个交点和直线之外的两个单元节点组合成一个新的四边形单元，再将新单元的节点坐标代入式（9.11-7）就可以求出新单元的面积。

设任意单元的节点坐标为（x_i，y_i），$i=1$，2，3，4，则其面积可计算如下：

$$S=\frac{1}{2}(x_{32}y_{12}-x_{12}y_{32})+\frac{1}{2}(x_{14}y_{34}-x_{34}y_{14}) \quad (9.11\text{-}7)$$

式中　$x_{ij}=x_i-x_j$，$y_{ij}=y_i-y_j$。

2)三角形。如图 3.4-30b 所示。此时两个交点与直线之外的一个单元节点形成一个三角形。将三角形的三个节点按逆时针编号，并设编号后的节点坐标为(x_i，y_i)，$i=1,2,3$，则其面积计算如下：

$$S=(x_{32}y_{12}-x_{12}y_{32})/2 \quad (9.11\text{-}8)$$

3) 五边形。如图 9.11-11c 所示。这种情况下，单元与直线的两个交点和单元位于直线之外的三个节点形成了一个五边形，同时和单元的另一个节点形成了一个三角形。此时，我们可以先按照上面的方法，计算出三角形的面积，再计算出整个四边形单元的面积，用单元的面积减去三角形的面积就可以得到五边形的面积。

综合考虑上述情况，则目标函数也就是超出部分的面积可表示如下：

$$\psi = \sum_{n=1}^{M} A_n \tag{9.11-9}$$

式中，A_n 为第 n 个需计算面积的单元面积；M 为需计算面积的单元总数。

利用式（9.11-9）就可以计算出平面应变问题目标函数 ψ。当 ψ 越小，实际获得的最终成形件超出预定理想直线之间部分的面积就越小，终锻模具的充填状况也就越好。

3.1.2 轴对称问题

对于轴对称问题，由于零件的形状是和体积相对应的，即使是相同的截面面积，离对称轴距离的不同其体积也不相同。因而再用截面面积表示形状的差异是不恰当的，所以可采用体积来表示形状的差异，也就是以超出部分的体积作为优化的目标函数。

轴对称情况下单元和直线之间的关系与平面变形情况是相同的，计算方法也类似，不同的是计算单元超出部分是体积而不是面积。其目标函数可表示如下：

$$\psi = \sum_{n=1}^{M} V_n \tag{9.11-10}$$

式中，V_n 为第 n 个需计算体积的单元体积；M 为需计算体积的单元总数。

对于任意四边形轴对称单元 n，设单元节点的坐标为 (x_i, y_i)，$i=1, 2, 3, 4$，其体积可计算如下：

$$V_n = \frac{1}{2}C_1(x_{32}y_{12} - x_{12}y_{32}) + \frac{1}{2}C_2(x_{14}y_{34} - x_{34}y_{14}) \tag{9.11-11}$$

式中，$x_{ij} = x_i - x_j$，$y_{ij} = y_i - y_j$，x，y 为单元节点坐标，C_1，C_2 为两个系数，$C_1 = \frac{2\pi}{3}(x_1 + x_2 + x_3)$，$C_2 = \frac{2\pi}{3}(x_1 + x_3 + x_4)$。

计算出目标函数后，就可以利用黄金分割法进行锻件毛坯形状的优化。其优化设计方法如图 9.11-12 所示。

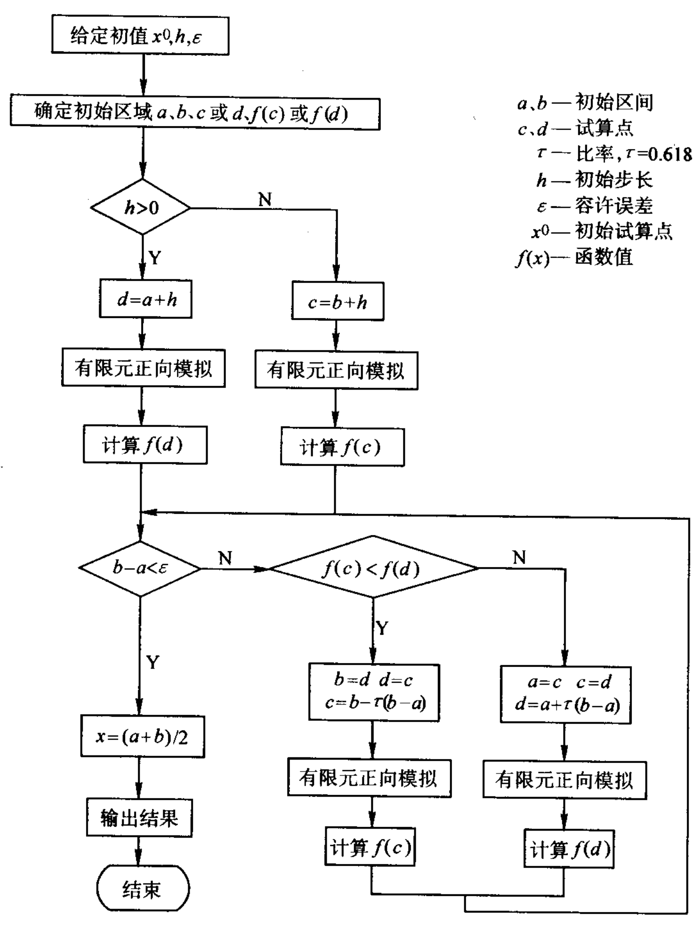


图 9.11-12 毛坯优化设计流程图

3.2 优化设计实例

采用上述方法，分别对截面为 H 形轴对称锻件和平面应变变形锻件的毛坯形状进行了优化设计。

3.2.1 轴对称问题

本节以实际锻件超出预定理想直线部分的体积为目标函数，圆柱体毛坯的高径比为优化设计变量，目标是获得充填情况最好，同时飞边最小的终锻件。轴对称锻件和初始坯料尺寸分别如图 9.11-13 和图 9.11-14 所示。

设整个锻造过程等温，材料为 20 钢，摩擦因子 $m=0.2$，上模速度为 -1.0 mm/s。由于锻件上下对称，故只取坯料的 1/4 进行优化。优化开始时优化设计变量（即圆柱体坯料的高径比）取为 0.5，具体坯料尺寸为 ϕ122.435 6 mm × 61.217 8 mm。图 9.11-15 表示目标函数随优化迭代次数的变化情况。由图可看出，经过 13 次优化迭代，目标函数由 2 200 mm^3 左右下降到最后的 300 mm^3，大约下降了 80%，优化效果明显。图 9.11-16 显示了优化设计变量随优化迭代次数的变化情况。由图 9.11-16 可以看出，优化设计变量（即坯料的高径比）从初始值 0.5 开始升高，当到达最高点 1.0 左右后开始下降，然后在 0.75 左右振荡，最后收敛在 0.75 左右。优化趋势比较明显。

图 9.11-17 给出了不同优化迭代下的终锻件形状的比较，



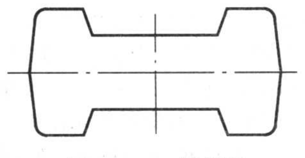


图 9.11-13　锻件图

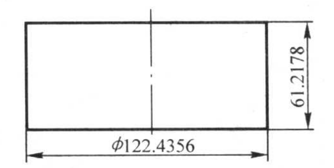


图 9.11-14　坯料尺寸

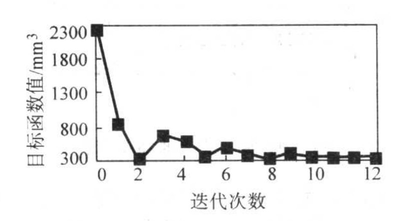


图 9.11-15　优化迭代中目标函数的变化

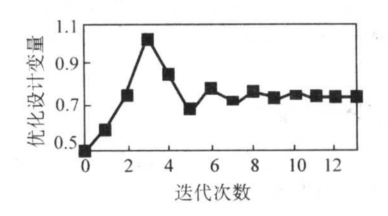


图 9.11-16　优化迭代中设计变量的变化

图 9.11-18 给出了优化过程中终锻件的变化情况，由图 9.11-17 和图 9.11-18 可以看出，第一次优化时得到的终锻件飞边较大，同时终锻模具型腔有很明显的充不满现象发生，而优化最后得到的终锻件不仅飞边减小了，而且终锻模具型腔完全充满，取得了明显的优化效果，达到了优化的目的。

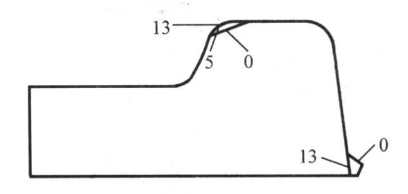
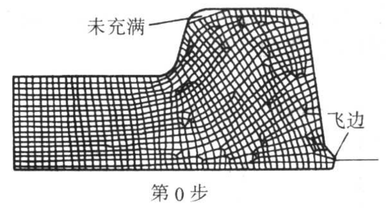


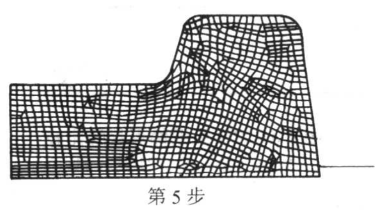
图 9.11-17　终锻件形状的比较
0、5、13—优化迭代次数

3.2.2　平面应变问题

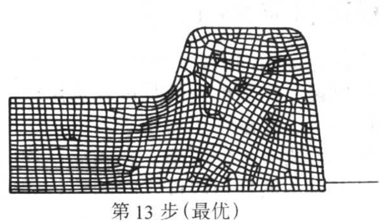
以实际锻件超出预定理想直线部分的面积为目标函数，以毛坯的高宽比为优化设计变量，对二维平面应变变形问题的毛坯形状进行优化设计。图 9.11-19 为终锻件形状，设整个过程等温，材料为 20 钢，摩擦因子 $m=0.2$，上模速度为 -1.0 mm/s。由于锻件上下对称，故只取坯料的 1/4 进行优化。优化开始时优化设计变量，即矩形截面坯料的高宽比取为 0.8，具体坯料尺寸为 26.909 98 mm × 21.527 98 mm。图 9.11-20 显示了目标函数随优化迭代次数的变化情况。



第 0 步



第 5 步



第 13 步（最优）

图 9.11-18　优化过程中终锻件形状的变化

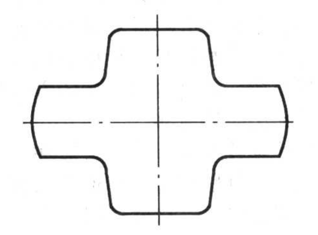


图 9.11-19　终锻件形状

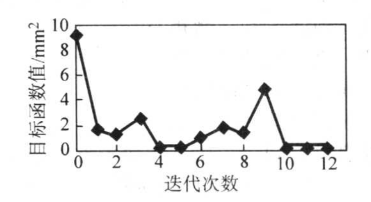


图 9.11-20　优化迭代中目标函数的变化

由图可看出，经过 13 次优化迭代，目标函数由 9.5 mm² 左右下降到最后的 0.1 mm² 左右，大约下降了 90%，优化效果明显。图 9.11-21 显示了优化设计变量随优化迭代次数的变化情况。可见优化设计变量（即坯料的高宽比）从初始值 0.8 开始升高，中间虽略有振荡，最终仍收敛在 1.42 左右。优化趋势比较明显。

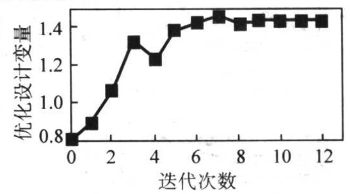


图 9.11-21　优化设计变量的变化

图 9.11-22 给出了不同优化迭代下的终锻件形状的比较。可见第一次优化时得到的终锻件飞边较大，同时终锻模型腔有很明显的充不满现象发生，而优化最后得到的终锻件不仅



飞边减小了，而且终锻模具型腔完全充满，取得了明显的优化效果，达到了优化的目的。

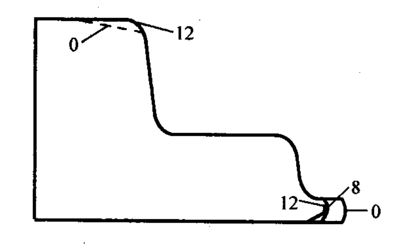


图 9.11-22　终锻件形状的比较
0、8、12—优化迭代次数

4　锻造载荷和应力的计算

在锻模的计算机辅助设计过程中，有一些设计程序，例如布置型槽的位置、校核模具的强度和选用锻造设备等，都需要计算锻造载荷、能量和压力中心。

模锻时的金属变形十分复杂。金属的不均匀流动、相当大的接触摩擦力以及模具与锻件之间的热传导使得问题的求解极为困难。

人工设计时，计算锻造载荷通常采用经验比较法或使用经验公式。这些方法所得的结果一般不太准确，和实测数据相差较大。另外，用这些方法计算时不可能得到应力的分布情况。所以，目前大多数锻模计算机辅助设计系统不再采用经验的方法计算载荷，而是利用分析的方法求解。其中，以主应力法和有限元法应用较多。

利用计算机计算载荷时，首先将锻件分解为具有一定变形方式的若干区域，分别对每一变形区求解，然后将结果综合起来，便可得到整体解。这就是以主应力法为基础的模块分析方法。

根据锻件的变形特点，可定义如下四种变形方式：

平面应变、横向流动（镦粗）；

平面应变、纵向流动（挤压）；

轴对称、横向流动（镦粗）；

轴对称、纵向流动（挤压）。

任何锻件总可以划分为用上述变形方式定义的不同变形区域。图 9.11-23 所示为一飞机结构锻件，图 9.11-24 为其简化图形。在图 9.11-24 中，$A_1C_1B_1$ 左边的部分和 $A_rC_rB_r$ 右边的部分被近似为轴对称流动；C_1C_r 为中性面，中部区域假定为平面应变。

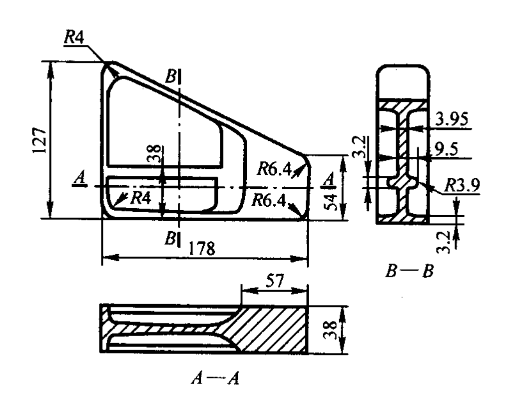


图 9.11-23　飞机结构锻件

$A_1C_1B_1$ 左边和 $A_rC_rB_r$ 右边的区域可以进一步地划分成如图 9.11-24 所示的小三角形单元。三角形的底边 ΔS 在锻件轮廓上，距离 R_i、R_j 可以算得。这些小三角形可以视为半径 $R=(R_i+R_j)/2$、夹角为 γ 的轴对称变形单元，总的载荷为小单元上的载荷之和。因为轴对称变形单元中心处的应力 σ_y 为半径的函数，所以在不同的变形单元中，C_1 点的应力 σ_y 不相同。程序中取各变形单元在 C_1 点应力的平均值作为该点的应力值。$A_rC_rB_r$ 右边区域的处理方法与此类似。

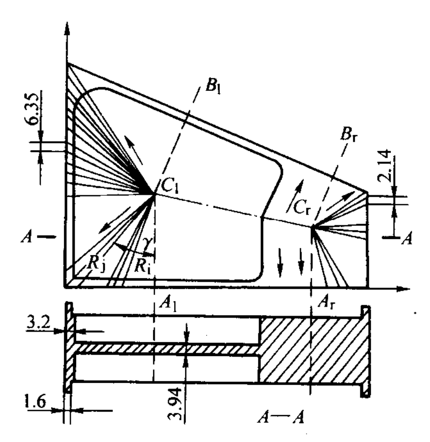


图 9.11-24　锻件的简化图形

计算各变形单元的应力与载荷时使用主应力法。下面以轴对称横向流动（镦粗）的情况为例，说明主应力法计算公式的推导过程，并给出其他变形方式的计算公式。在公式推导中所作假设为：材料为各向同性；忽略弹性变形；不计惯性力；在变形单元内流动应力 $\bar{\sigma}$ 为常数（但不同变形区 $\bar{\sigma}$ 值可以不同）。

4.1　轴对称横向流动

考虑图 9.11-25 表示的上下倾斜面之间的金属流动情形，可以写出如下径向平衡方程式：

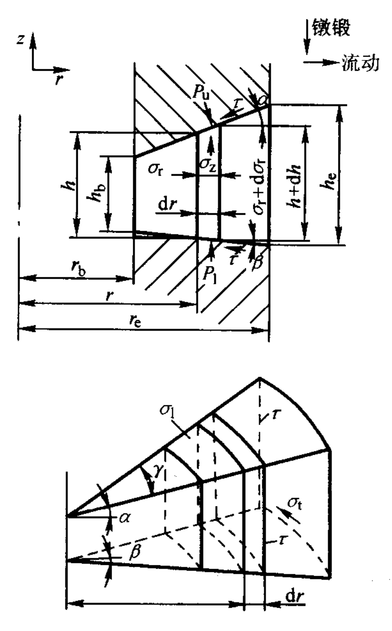


图 9.11-25　上下倾斜面间的金属流动

$$
\begin{aligned}
&\sigma_r r\mathrm{d}\gamma h-(\sigma_r+\mathrm{d}\sigma_r)(r+\mathrm{d}r)\mathrm{d}\gamma(h+\mathrm{d}h) \\
&+2\sigma_z\sin\frac{\mathrm{d}\gamma}{2}\left(h+\frac{\mathrm{d}h}{2}\right)\mathrm{d}r-\tau\frac{\mathrm{d}\gamma r\mathrm{d}r}{\cos\alpha}\cos\alpha-\tau\frac{\mathrm{d}\gamma r\mathrm{d}r}{\cos\beta}\cos\beta \\
&+p_u\frac{r\mathrm{d}\gamma\mathrm{d}r}{\cos\alpha}\sin\alpha+p_l\frac{r\mathrm{d}\gamma\mathrm{d}r}{\cos\beta}\sin\beta=0 \qquad (9.11\text{-}12)
\end{aligned}
$$

因为 $\sin\dfrac{\mathrm{d}\gamma}{2}\approx\dfrac{\mathrm{d}\gamma}{2}$，并假定径向应变增量和切向应变增量



相等，即有 $d\varepsilon_r = d\varepsilon_i$ 或 $\sigma_r = \sigma_i$，忽略高阶微分后式（9.11-12）变为

$$-h d\sigma_r - \sigma_r dh - 2\tau dr + dr(p_u \tan\alpha + p_l \tan\beta) = 0 \quad (9.11\text{-}13)$$

分析 z 方向上的平衡，在上接触表面有

$$\sigma_z dr d\gamma r - p_u r \frac{d\gamma dr}{\cos\alpha}\cos\alpha - \tau r \frac{d\gamma dr}{\cos\alpha}\sin\alpha = 0$$

即

$$p_u = \sigma_z - \tau\tan\alpha \quad (9.11\text{-}14)$$

在下接触表面有

$$p_l = \sigma_z - \tau\tan\beta \quad (9.11\text{-}15)$$

将式（9.11-14）、式（9.11-15）代入式（9.11-13）得

$$-h d\sigma_r - \sigma_r dh - 2\tau dr + dr(\sigma_z \tan\alpha - \tau\tan^2\alpha + \sigma_z \tan\beta - \tau\tan^2\beta) = 0 \quad (9.11\text{-}16)$$

因为

$$dh = dr(\tan\alpha + \tan\beta)$$

$$h = h_b + (r - r_b)(\tan\alpha + \tan\beta)$$

以及由塑性条件得到的关系式 $d\sigma_z = d\sigma_r$，方程（9.11-16）可化为

$$\frac{d\sigma_z}{dr} = -\frac{1}{(K_3 + K_1 r)}K_2 \quad (9.11\text{-}17)$$

式中 $K_1 = \tan\alpha + \tan\beta$

$K_2 = -\bar{\sigma}K_1 + \tau\ (2 + \tan^2\alpha + \tan^2\beta)$

$K_3 = h_b - r_b$

将式（9.11-17）积分，并由在 $r = r_e$ 处 $\sigma_z = \sigma_{ze}$ 的边界条件得

$$\sigma_z = \frac{K_2}{K_1}\ln\left(\frac{h_e}{K_3 + K_1}\right) + \sigma_{ze} \quad (9.11\text{-}18)$$

式（9.11-18）表示了轴对称横向流动时轴向应力的分布。作用于图 9.11-25 所示的环形区域的载荷可通过积分求得。作用于夹角为 θ 的扇形变形单元上的载荷为

$$P = \int_{r_b}^{r_e}\sigma_z \theta r dr = \frac{\theta K_2}{K_1}\int_{r_b}^{r_e}\ln(K_3 + K_1 r) r dr + \theta\int_{r_b}^{r_e}\left(\sigma_{ze} + \frac{K_2}{K_1}\ln h_e\right) r dr$$

积分后得

$$P = \frac{\theta K_2}{K_1^3}\left[\frac{h_e^2}{2}\left(\ln h_e - \frac{1}{2}\right) - \frac{h_b^2}{2}\left(\ln h_b - \frac{1}{2}\right) - K_3 h_e(\ln h_e - 1) + K_3 h_b(\ln h_b - 1)\right] + \frac{\theta}{2}\left(\sigma_{ze} + \frac{K_2}{K_1}\ln h_e\right)(r_e^2 - r_b^2) \quad (9.11\text{-}19)$$

如果 $\alpha = 0$，$\beta = 0$，即对于两个水平面之间的轴对称横向流动，则有

$$\sigma_z = \frac{2\tau}{h}(r_e - r) + \sigma_{ze} \quad (9.11\text{-}20)$$

$$P = \theta\left[-\frac{2\tau}{h}\left(\frac{r_e^3 - r_b^3}{3}\right) + \left(\frac{2\tau r_e}{h} + \sigma_{ze}\right)\left(\frac{r_e^2 - r_b^2}{2}\right)\right] \quad (9.11\text{-}21)$$

4.2 轴对称轴向流动

轴对称轴向流动，即挤压时金属的流动方向与锻模的运动方向平行。这里可分为两种情况考虑。

（1）轴向流动形成圆台（图 9.11-26）

轴向应力分布为

$$\sigma_z = K\ln\left(\frac{r_b - z\tan\gamma}{r_b - z_e\tan\gamma}\right) \quad (9.11\text{-}22)$$

作用在夹角为 θ 的变形单元上的载荷为

$$P = \frac{\theta}{2}r_b^2 K\ln\left(\frac{r_b}{r_b - z_e\tan\gamma}\right) \quad (9.11\text{-}23)$$

式中 $K = \dfrac{2\ [\tau\ (1 + \tan^2\gamma)\ + \bar{\sigma}\tan\gamma]}{\tan\gamma}$

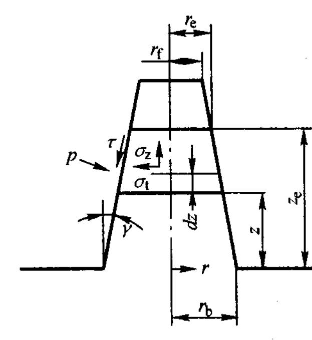


图 9.11-26 轴向流动形成圆台

（2）轴向流动形成环形筋（图 9.11-27）

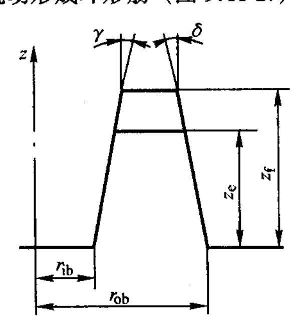


图 9.11-27 轴向流动形成环形筋

轴向应力分布为

$$\sigma_z = \frac{D}{2C}\ln(A + 2Bz + Cz^2) + \left(E - \frac{BD}{C}\right)\left(\frac{-1}{2F}\right)\ln\left(\frac{F + Cz + B}{F - Cz - B}\right) + I \quad (9.11\text{-}24)$$

作用在夹角为 θ 的变形单元上的载荷力

$$P = \frac{\theta}{2}({r_{ob}}^2 - {r_{ib}}^2)\sigma_{zo} \quad (9.11\text{-}25)$$

式中，$A = {r_{ob}}^2 - {r_{ib}}^2$

$B = r_{ib}\tan\gamma - r_{ob}\tan\delta$

$C = \tan^2\delta - \tan^2\gamma$

$D = 2\left[\bar{\sigma}C - \tau\left(\frac{\tan\delta}{\cos^2\delta} - \frac{\tan\gamma}{\cos^2\gamma}\right)\right]$

$E = 2\left[-\bar{\sigma}(r_{ib}\tan\gamma + r_{ob}\tan\delta) - \tau\left(\frac{r_{ib}}{\cos^2\gamma} + \frac{r_{ob}}{\cos^2\delta}\right)\right]$

$F = r_{ob}\tan\gamma - r_{ib}\tan\delta$

$I = -\frac{D}{2C}\ln(A + Bz_e + Cz_e^2) + \left(E - \frac{DB}{C}\right)\left(\frac{1}{2F}\right)\ln\frac{F + Cz_e + B}{F - Cz_e - B}$

4.3 平面应变、横向流动（图 9.11-28）

垂直方向的应力分布为

$$\sigma_y = \frac{K_2}{K_1}\ln\left(\frac{h_e}{h_b + K_1 X}\right) + \sigma_{ye} \quad (9.11\text{-}26)$$

式中 $K_1 = \tan\alpha + \tan\beta$

$K_2 = \frac{-2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}K_1 + \tau\ (2 + \tan^2\alpha + \tan^2\beta)$

作用在单位厚度变形单元上的载荷为

$$P = -\frac{K_2}{K_1^2}[h_e(\ln h_e - 1) - h_b(\ln h_b - 1)] + \left(\sigma_{ye} + \frac{K_2}{K_1}\ln h_e\right)X_e \quad (9.11\text{-}27)$$

式（9.11-26）和式（9.11-27）对于图 9.11-28 所示的各



种情况皆适用，只是对于每种情况 α、β 应取合适的符号。

1）发散流动（图 9.11-28a）：$\alpha<0$，$\beta<0$。

2）聚敛流动（图 9.11-28b）：$\alpha>0$，$\beta>0$。

3）上升流动（图 9.11-28c）：$\alpha>0$，$\beta<0$。

4）下降流动（图 9.11-28d）：$\alpha<0$，$\beta>0$。

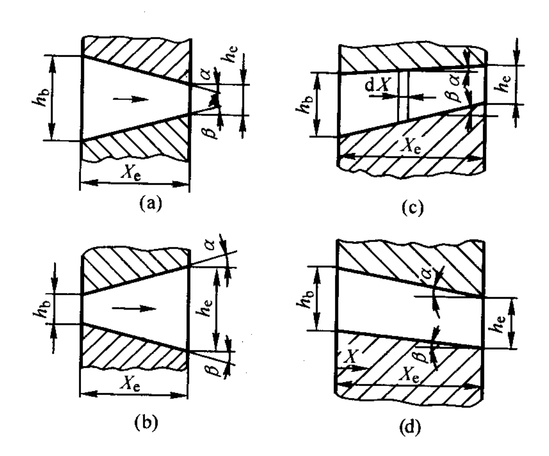


图 9.11-28　平面应变横向流动

对于 $\alpha=0$，$\beta=0$ 的情形（即金属在两水平面之间的平面应变）有

$$\sigma_y=\frac{2\tau}{h}(X_e-X)+\sigma_{ye} \tag{9.11-28}$$

$$P=X_e\left(\sigma_{ye}+\frac{\tau X_e}{h}\right) \tag{9.11-29}$$

4.4　平面应变、纵向流动形成筋（图 9.11-29）

水平方向上的应力分布为

$$\sigma_x=\frac{K_2}{K_1}\ln\left(\frac{W_e}{W_b+K_1 y}\right)+\sigma_{ze} \tag{9.11-30}$$

式中，　$W_e=W_b+K_1 y_e$

$K_1=-(\tan\gamma+\tan\delta)$

$K_2=\frac{-2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}K_1+\tau(2+\tan^2\gamma+\tan^2\delta)$

利用塑性条件可得

$$\sigma_y=\sigma_z-\frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma} \tag{9.11-31}$$

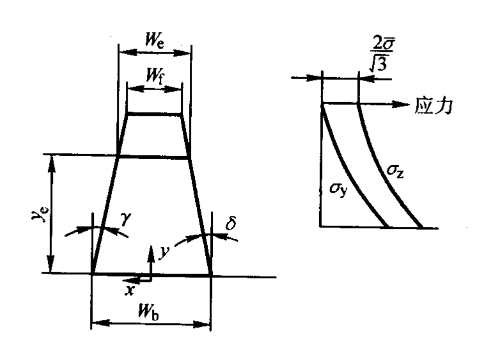


图 9.11-29　平面应变纵向流动

因此，式（9.11-30）、式（9.11-31）可用来计算垂直方向的应力分布。作用在单位厚度变形单元上的载荷为

$$P=W_e\left[\frac{K_2}{K_1}\ln\left(\frac{W_e}{W_b}\right)+\sigma_{ze}-\frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}\right]$$

上述的金属流动模型和计算公式可以很方便地用程序实现，而且计算的载荷与实际锻造载荷符合较好。

当金属流动不是发生在模具和锻件的接触面时，有必要确定锻件内部的剪切面。图 9.11-30 为金属内部发生剪切变形的例子，金属沿剪切面流入飞边槽。这时，为了建立金属流动的模型，须先求出计算应力 σ_{yn} 的表达式，然后求出使 σ_{yn} 为极小值的角度 α 和高度 h。图 9.11-31 为在长轴锻件的一个变形区域中建立的流动模型和用上述方法求得的应力分布情况。

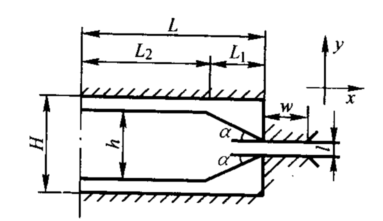


图 9.11-30　金属内部发生剪切变形

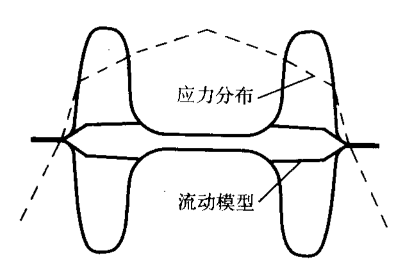


图 9.11-31　流动模型与应力分布

用主应力法计算载荷和应力分布时，流动应力 $\bar{\sigma}$ 和摩擦系数 f 对计算精度的影响很大。在接触面上剪应力 $\tau=\bar{\sigma}f$。各种材料在不同锻造条件下的摩擦系数可以通过圆环镦粗测得。因为流动应力是应变、应变速率和温度的函数，所以在计算时有必要对温度进行一些估算，以便利用实验数据确定流动应力 $\bar{\sigma}$。

在计算锻件的平均温度 θ_F 时，要考虑坯料的初始温度 θ_s、由于变形和摩擦作用而增加的温度 θ_d 和 θ_f、以及由于热传导而引起的温度下降 θ_c。这时有

$$\theta_F=\theta_s+\theta_d+\theta_f-\theta_c$$

为了简化计算，忽略摩擦引起的温度增加，可以认为接触面上的摩擦起到了使各变形区温度均布的作用。在计算平均温度时，因为锻件各部分厚薄不同，传热条件也不同，各个变形区域可以分别计算。计算时，将锻件的各部分当作温度均布的板处理，板的两边热传导相同，不考虑各变形区域内部的温度梯度。因此，可得到如下热平衡方程：

$$\theta=\theta_i+(\theta_s-\theta_i)\exp\left(-\frac{\alpha T}{c\rho t}\right) \tag{9.11-32}$$

式中，θ 为锻件的平均温度；θ_i 为模具表面的初始温度；θ_s 为毛坯的初始温度；α 为热传导系数；T 为锻件和模具的接触时间；c 为锻件材料的比热容；ρ 为锻件材料的密度；t 为板的平均厚度。

另一方面，由于变形引起的温度增加

$$\theta_d=A\bar{\sigma}_a\bar{\varepsilon}_a/c\rho \tag{9.11-33}$$

式中，A 为热功当量；$\bar{\sigma}_a$ 和 $\bar{\varepsilon}_a$ 分别为平均流动应力和应变。

因此，变形区域的平均温度

$$\theta_F=\theta+\theta_d \tag{9.11-34}$$

用上述方法估算各个变形区域的平均温度，从而可以确

定 $\bar{\sigma}$。因为锻件各部分的几何尺寸不同，热传导条件不同，所以算得的各变形区域的平均温度和流动应力也不相同，使计算结果比较符合实际。

5　轴对称件锻模 CAD 系统

据统计，轴对称锻件约占锻件总数的 30% ~ 40%。因此，应建立轴对称锻件锻模的 CAD 系统。

轴对称零件的几何构型较易实现。通过定义半个轴截面的几何形状，可以完成整个零件的构型，也就是说这类锻件的几何描述可用二维的方法实现。另外，和其他类别的锻件相比，轴对称锻件的模具设计方法相对简单一些。所以，最早的锻模 CAD 系统大多从这类锻模入手。

5.1　轴对称件锻模 CAD/CAM 系统的组成

轴对称件锻模 CAD/CAM 系统主要包括：零件几何形状的描述、锻件设计和锻件图绘制、模锻工艺设计、锻模设计和锻模图绘制、NC 加工程序的编制。系统框图如图 9.11-32 所示。

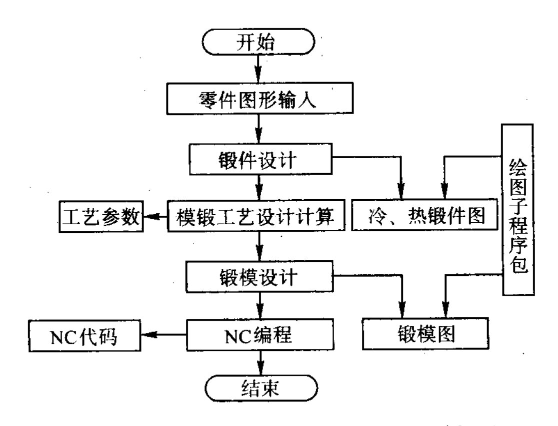


图 9.11-32　轴对称件锻模 CAD/CAM 系统框图

系统运行时，首先需输入零件的几何形状、材料和工艺条件等信息，为后续的锻件设计、工艺设计和锻模设计提供必要的信息。

锻件设计指的是设计冷锻件图和热锻件图，包括选择分模面、补充机加工余量、添加圆角和拔模斜度等内容。工艺设计决定是否采用预成形工序，以及选择设备吨位等。

在建立系统时，对模具结构进行了标准化。设计模具时，只有少数零件需要根据不同锻件进行设计，从而大大提高了设计效率。

轴对称件锻模的模芯和顶杆等零件可在数控车床上加工。系统可为数控车床编制加工零件的 NC 程序。

5.2　轴对称锻件几何形状的输入

锻模 CAD 系统要求使用者输入零件形状、材料和加工条件等信息。虽然有些信息可以在系统运行过程中以交互方式输入，但有关零件的几何形状和尺寸信息则必须在运行的最初阶段输入，因为这些信息是后续锻件设计和锻模设计的基础和依据。

轴对称锻件可通过定义半个截面的几何形状，完成整个零件形状的定义，也就是说，这类零件的几何描述可用二维的方法实现。

目前，锻模 CAD 系统大都以一个通用的图形软件（如 AutoCAD 等）为基础，锻件图可以利用这些图形系统的交互设计命令来定义。

5.3　锻件设计

锻件设计流程如图 9.11-33 所示。其中，分模面一般表现为锻件轮廓图上的一条线，可以简单地采取点拾取函数从图中点取。而敷料的设计在零件图交互输入时，可以输入带敷料的图形。添加机加工余量时，逐一判别零件各表面是否为机加工面。一般表面粗糙度非零的表面，就是机加工面，需要添加机加工余量。从几何意义上讲，添加机加工余量，具体表现为加工表面的平移，可以用图形系统的交互命令完成。锻件的公差和机械加工余量值是由设计者根据实际情况和设计规范选定的，可参考有关标准。

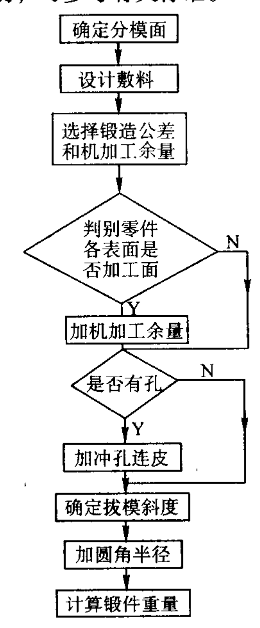


图 9.11-33　锻件设计流程图

锻件上与分模面垂直的面要加一定的拔模斜度，以便锻件成形后从锻模型槽中顺利取出。影响拔模斜度设计的因素比较多，可以采用自动设计和交互选择相结合的方法确定拔模斜度值。系统中用拔模斜度值和锻件相应的几何尺寸计算出有关点的移动量，然后将其移至相应位置，或者采用尺寸驱动的方法赋予相应点新的尺寸值。

从利于金属在型槽内流动和保证锻模强度考虑，设计锻件时，在不同面之间必须设计过渡圆角。可根据锻件精度及锻件重量，确定外圆角半径 R_1，内圆角半径 R_2 取为 $2.2R_1$，并对 R_1、R_2 进行圆整，取标准值。程序对每个节点进行判断。

若为内圆角，且 $R[I] < R_2$，则 $R[I] = R_2$。

若为外圆角，且 $R[I] < R_1$，则 $R[I] = R_1$。

当锻件内孔直径大于 30 mm 时，要设计冲孔连皮，通常采用图 9.11-34 所示的两种冲孔连皮方式。

计算零件和锻件的重量时，需确定其体积。体积可用下式计算：

$$V = 2\pi R_g (F/2)$$

式中，R_g 为半截面重心与对称轴之间的距离；$F/2$ 为半个截面的面积。

由 n 条边构成的多边形的面积和重心计算公式如下：

$$F/2 = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}(x_{i+1}y_i - x_i y_{i+1})$$

$$R_g = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{n}(x_{i+1}^2 y_i - x_i^2 y_{i+1}) / (F/2)$$



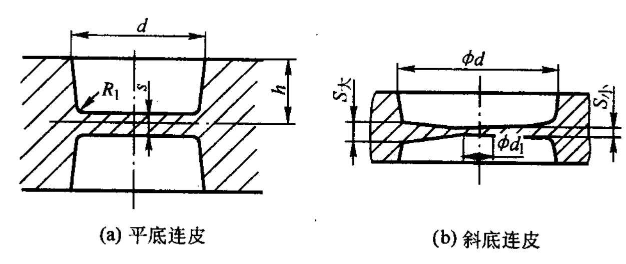


图 9.11-34　锻件冲孔连皮

为了适用上述公式，可将锻件上圆弧部分离散化，使锻件的截面简化为多边形。

设计锻模时，要根据热锻件图设计终锻型槽。热锻件图设计主要包括锻件图的放大、飞边槽设计和钳口设计等内容。

5.4　锻模设计

因为采用标准的模具结构，所以只需要根据锻件形状和尺寸设计模芯。模芯的外轮廓形状已存入计算机内，加上型槽的形状就构成了模芯的完整图形。程序可根据锻件底部的轮廓形状选择合适的顶杆直径。设计人员也可以自行选择合适的顶杆。图 9.11-35 为输出的上、下模芯和顶杆的装配图。

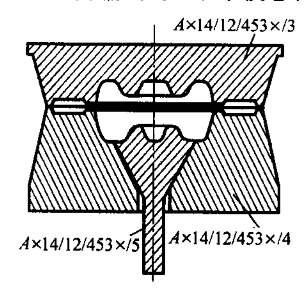


图 9.11-35　上、下模芯和顶杆装配图

6　长杆类锻模 CAD 系统

长杆类锻件代表着另一类广泛应用的锻件，无论是工序设计、分析计算，还是模具结构设计，其设计过程都比轴对称锻件复杂得多。因此，建立长杆类锻模 CAD 系统的难度较大。

6.1　长杆类锻模 CAD/CAM 系统的总体结构

图 9.11-36 所示为一锤上杆类锻模 CAD/CAM 系统的结构框图，系统由几何造型、工艺设计、制坯型槽设计、预锻型槽设计、终锻型槽设计、型槽布置和 NC 自动编程等部分组成。

长杆类锻件几何形状比轴对称锻件复杂得多，所以要利用三维几何造型方法建立其几何模型。目前，有很多商品化三维造型软件可供选用，例如 PRO/ENGINEER、UG 等系统都有较强的造型功能。利用这些软件进行锻模设计，可方便地提取锻件的有关信息，包括体积计算、截面形状生成等，还可以利用其造型功能设计锻模型槽。

工艺设计部分是锻模设计的重要内容，进行模锻工艺设计时，首先由已建立的锻件几何模型计算出其体积、净重、投影面积、长度和形状复杂系数。在此基础上，求得质量分布曲线、计算坯料图和方块图，确定锻造工序，计算飞边消耗，设计飞边槽几何形状和毛坯尺寸，估算锻造载荷和能量，并选择所用设备。工艺设计模块产生的这些数据可供后续模块使用。

设计预锻型槽时，首先设计若干具有代表性的型槽截

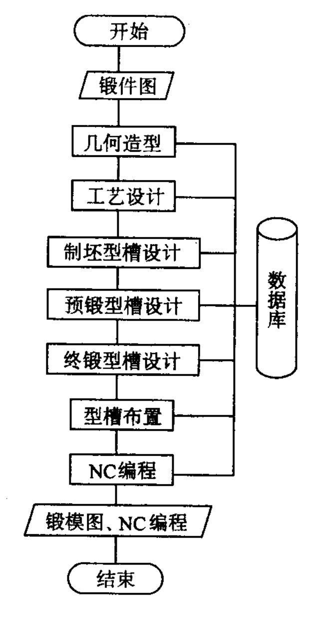


图 9.11-36　长杆类锻模 CAD/CAM 系统的结构框图

面，再利用几何造型系统的功能，参照描述锻件形状时所用的体素，构成预锻型槽的形状。

当所有的型槽设计完毕后，型槽布置程序完成模块的尺寸计算，确定各型槽的位置。首先，从数据库中读入锻造工序的数目、棒料尺寸、锻锤吨位和飞边几何形状的数据。各工序型槽轮廓的数据也被用作型槽布置时的输入信息。该模块最后输出的是锻模型槽布置图，包括模块的总体尺寸、安装尺寸以及各型槽的相对位置尺寸。

6.2　模锻工艺设计

工艺设计模块的主要任务是确定锻造工序，计算工艺参数，并为后续设计程序准备必要的数据，图 9.11-37 为该模

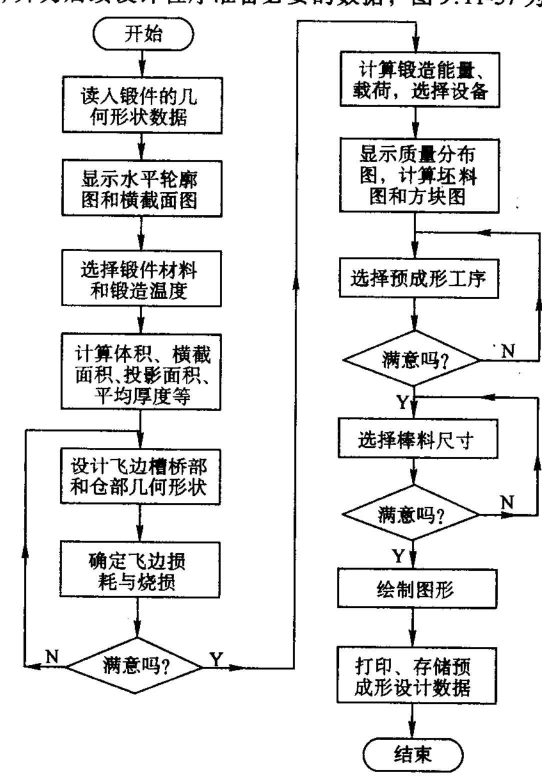


图 9.11-37　工艺设计流程图

块的流程框图。根据输入的锻件几何形状信息，程序可以计算出毛坯尺寸、锻造载荷等参数，确定锻造工序，设计飞边槽尺寸等。该模块提供的交互设计功能，允许用户根据实际情况确定自己认为合理的参数与方案。

毛坯计算是选择制坯工步、设计制坯型槽和确定坯料尺寸的主要依据。将锻件离散化为一系列垂直于轴线方向的薄片，如图 9.11-38 所示，利用造型软件的剖切功能，生成一系列横截面图。计算各个截面的面积和相应处平均直径，可产生质量分布图和计算坯料图。使用者可根据质量分布曲线，通过控制光标，将锻件分为头、杆不同部分，程序可将其转换为设计拔长和滚挤型槽时将要用到的方块图。

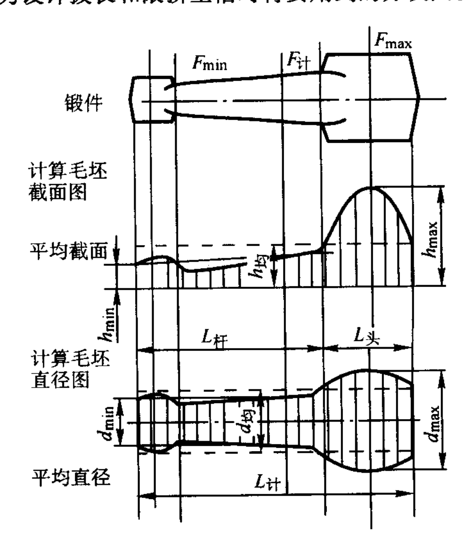


图 9.11-38　锻件毛坯的计算

毛坯计算时，首先要计算锻件的截面面积。锻件截面面积计算的一般步骤是选取截面，求出截面轮廓，再计算截面轮廓的面积。选取截面和计算截面面积都可以利用所选支撑软件的功能来实现，不同的 CAD/CAM 系统的程序步骤基本相同。图 9.11-39 所示为锻件截面面积计算的流程图。

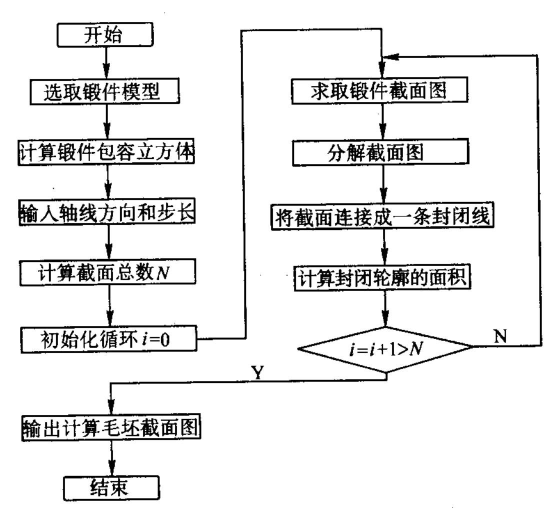


图 9.11-39　锻件截面面积计算

预成形工序的设计也是在工艺设计模块完成的。预成形工序包括拔长、滚挤和预锻。预成形工序的选择除了决定于锻件本身的形状复杂性外，还受到工厂设备、生产批量和经济性等因素的影响。程序按建立的数学模型选择预成形工序，用户可以接受程序设计结果，也可以对方案加以修改，或另行选择自已认为更好的方案。

通常根据图 9.11-40 所示的线图选择制坯工步。图中 y 为计算毛坯图中最大直径与平均直径之比，x 为锻件长度与平均直径之比。G 为锻件重量。A、B、C 三条曲线所确定的几个区域，分别表示需要拔长和滚挤制坯、闭式滚挤制坯、开式滚挤制坯和不需制坯。

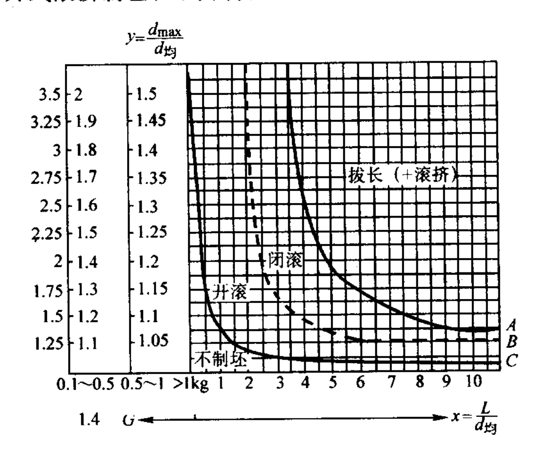


图 9.11-40　确定制坯工步的线图

将曲线 ABC 离散化处理后，采用四次多项式拟合曲线，可得到曲线的方程。

A：$y = 0.500\ 063 + 6.730\ 503/(x - 2.829\ 102)$

B：$y = 0.685\ 949 + 2.318\ 586/(x - 1.735\ 835)$

C：$y = -2.029\ 169E - 0.2 + 1.660\ 974/(x + 6.568\ 23E - 0.2)$

根据所得公式和计算毛坯图的有关数据，即可确定制坯工步。

6.3　拔长型槽的设计

拔长型槽由坎部和仓部组成，坯料在坎部产生变形，仓部的作用是容纳已变形的金属。坎部的纵向轮廓有直线形和凸圆弧形两种。坎部的横向轮廓分为开式和闭式两种，前者为直线形，后者为凹圆弧形。纵向轮廓和横向轮廓的不同组合可以形成图 9.11-41 所示的四种拔长型槽。坎部高度 G 和坎部长度 L 为型槽的两个最重要的尺寸。

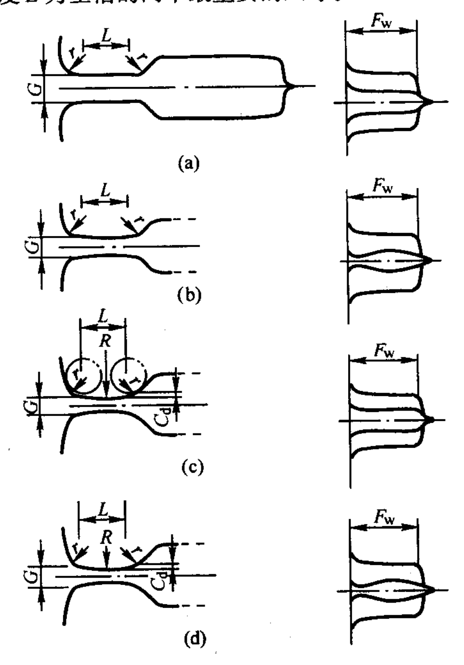


图 9.11-41　四种拔长型槽



棒料在拔长时的变形程度定义为

$$F = \frac{D_0 - G}{D_0}$$

式中，D_0 为拔长之前的棒料尺寸。

最大允许变形程度为

$$F_{er} = \frac{D_0 - G_{min}}{D_0}$$

式中，G_{min} 为允许的最小坎部高度。

毛坯拔长以后的形状和伸长与其在型槽内的放置位置有关。由于拔长时难以保证准确的放置，所以在设计拔长型槽时，假定两次打击（即翻转 90°的两次打击）后完成要求的伸长与断面减缩。设计时应保证在第一次打击之后，毛坯的形状满足镦粗要求，即其高度与宽度之比应小于 3。

6.3.1 拔长型槽设计程序的流程

图 9.11-42 为拔长型槽设计程序的流程图。首先，输入工艺设计模块产生的数据，包括质量分布曲线、计算坯料图和方块图等。将这些图形显示在屏幕上，设计人员可重新划分头、杆，产生新的方块图，或重新选择毛坯的尺寸。

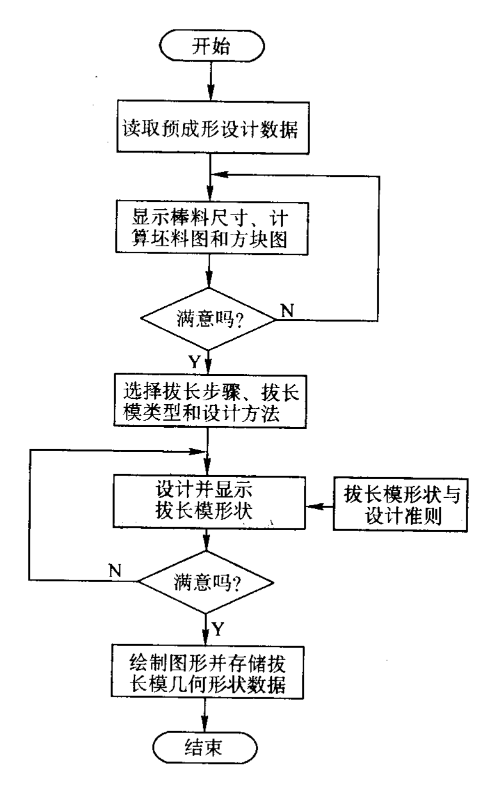


图 9.11-42 拔长型槽设计的流程图

拔长步骤和拔长模类型的选择可通过人机对话完成。设计人员可以根据显示的方块图和毛坯图指定拔长部分。

程序按照使用者选择的拔长模类型，自动完成型槽的设计，并显示有尺寸标注的设计结果。如果使用者对设计结果不满意，可以提出修改，包括改变变形程度和拔长长度等。程序按照使用者的意图重新设计，直至获得满意的结果。

6.3.2 拔长型槽的设计方法

拔长型槽的设计分为两个阶段，一是确定拔长步骤，二是设计模具几何形状。

在确定拔长步骤时要用到质量分布曲线（图 9.11-43a）和计算坯料图（图 9.11-43b）。根据截面变化情况将锻件分为头、杆部分，计算各段的体积和平均截面积可得到方块图（图 9.11-43b）。图中 $D_i = \left(\frac{V_i}{L_i}\right)^{\frac{1}{2}}$，其中 D_i、V_i、L_i 分别表示方块图中各块的高度、体积和长度。与方块图各段所对应的毛坯长度可由各段的体积和毛坯截面积求得（图 9.11-43c）。这些图形均已在工艺设计时得到，但在拔长模设计时仍可以重新分段，并按新的分段求取方块图。

拔长步骤的选择应能以最少的打击次数得到与计算坯料图相近似的形状。拔长步骤的选择主要由毛坯尺寸和方块图中所表示的横截面的变化所决定。以图 9.11-43 为例，应首先拔长 b 段和 c 段，使截面尺寸达到 c 段的要求，然后进一步拔长 b 段，获得方块图表示的形状。如果相邻段的横截面积相差不大，例如 $D_c - D_b < D_m$，其中 D_m 为某一规定值，则 b、c 段可以简化为一段（图 9.11-43d）。该段的截面尺寸为

$$D_{bc} = \left(\frac{V_b + V_c}{L_b + L_c}\right)^{\frac{1}{2}}$$

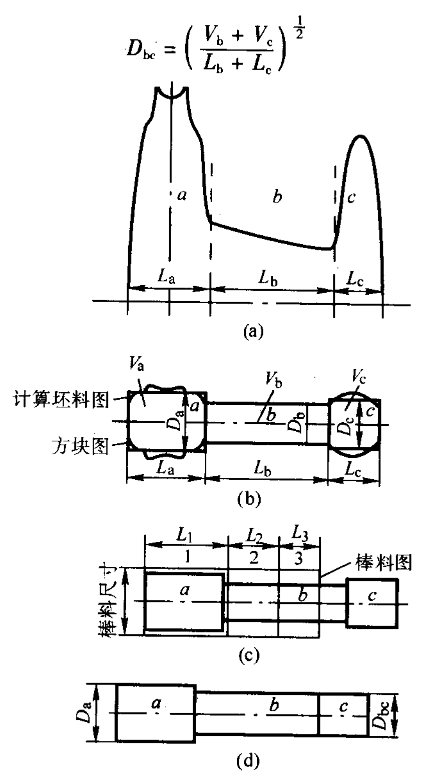


图 9.11-43 拔长型槽的设计

这时仅需一次拔长便可满足要求。设计人员可以改变 D_m 值，以便根据自己的需要确定简化头杆的判据。

设计拔长型槽的形状包括确定坎部高度、设计纵向轮廓和横向轮廓。手工设计通常采用的方法有几何作图法和查表法。因为这些设计方法在确定一些主要尺寸时缺少定量的分析，所以不适合于计算机辅助设计。

这里介绍一种适合于程序实现的设计方法。这种方法确定坎部高度 G（图 9.11-41）的算式为

对于平的纵向轮廓　$G = \sqrt{A}$

对于凸圆弧形的纵向轮廓　$G = \sqrt{A} - B$,

$1.6\ \text{mm} \leqslant B \leqslant 3.2\ \text{mm}$

式中，A 为不包括飞边在内的截面面积，这是因为拔长时不可能得到准确的方形，得到的截面总是较大的缘故。

为了防止失稳，G 不得小于棒料尺寸的 1/3，否则需要进行两次拔长。

坎部长度 L 的计算式为

$$L = L_f - 13\ \text{mm}$$

式中，L_f 为拔长长度，mm，即与该段相对应的毛坯长度。

对于凸圆弧形的纵向轮廓，弧形高度 G 和主圆弧半径 R（图 9.11-41c、d）的确定方法为



$$\begin{cases} G = 3.2\ \mathrm{mm} - 1.6\left(\dfrac{25}{D_0}\right) & 当\ D_0 > 25\ \mathrm{mm}\ 时 \\ G = 1.6\ \mathrm{mm} & 当\ D_0 \leqslant 25\ \mathrm{mm}\ 时 \end{cases}$$

$$R = \frac{G_i}{2} + \frac{L_f}{32}$$

拔长坎部宽度 F_w 为

$$\begin{cases} F_w = 0.75\dfrac{A}{G} \\ F_w \geqslant (1.4 \sim 1.5)\ D_0 \end{cases}$$

试验表明拔长时产生的宽展量不会超过平面应变时的75%，这就是上面算式中采用 0.75 的原因。另一方面，提供较宽的坎部可以防止因为毛坯放偏而产生夹缝或凸起。

6.4　滚挤型槽的设计

滚挤型槽用以减小坯料某部分的横截面积，增大另外部分的横截面积，在长度方向上分配金属，使毛坯接近于计算坯料的形状。另外，滚挤还可以去除氧化皮，消除拔长时产生的缺陷。

滚挤型槽由钳口、本体和尾部三个部分组成（图 9.11-44)。滚挤型槽按横截面形状可分为开式、闭式和混合式三种。图 9.11-44 为闭式滚挤型槽截面图。

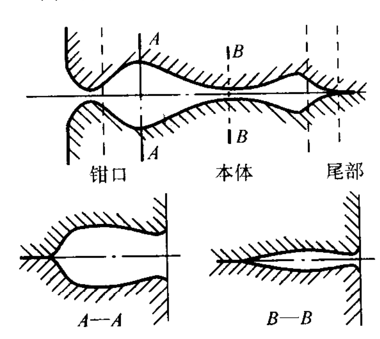


图 9.11-44　滚挤型槽的纵截面与横截面

本体部分的设计是滚挤型槽设计的主要内容，计算坯料图为设计的主要依据。虽然按计算坯料图制坯可获得最大的材料利用率，但是由于锻件形状的复杂性，要做到这一点实际上是不可能的。因此，通常的做法是根据计算坯料图简化毛坯形状，并用较大的圆弧或直线连接各部分以形成型槽本体部分的纵向轮廓。计算坯料图的分段方法和拔长模设计时的相同。

图 9.11-45 为滚挤型槽设计程序的流程图。作为输入信息的是工艺设计模块产生的计算坯料图、方块图和毛坯尺寸等数据。首先，程序将图形显示出来，这时设计人员可以重新分段或选择毛坯尺寸。接着，程序设计型槽本体部分的纵向轮廓，并将设计结果和计算坯料图同时显示，允许设计人员修改程序结果，或重新划分计算坯料图，产生形状完全不同的本体轮廓。设计横向轮廓时采用交互方式，使用者选择轮廓类型（开式或闭式）、程序计算型槽宽度，并显示横向轮廓。输入要求的宽度或轮廓类型，可以改变设计的横向轮廓。

下面说明一下用曲线拟合的方法设计型槽本体的过程。图 9.11-46a 为连杆锻件图，图 9.11-46b 为其计算坯料图和根据分段产生的方块图。在这里，计算坯料图分为三段，即二头一杆。如图所示，在方块图的每一部分定义三个点，然后用一段圆弧拟合。圆弧的起点、中点和终点的 x 坐标和每一段的左边、中线和右边的 x 相同。改变三个点的高度，即改变其 y 坐标，可以得到不同的拟合圆弧。程序可以自动处理，使得比相邻区高的方块用凸圆弧拟合，产生聚料作用；比相邻区低的，则用凹圆弧拟合，以产生赶料作用。

在对计算坯料图的每段拟合完毕后，程序根据相邻圆弧是否相交，用圆弧或直线连接相邻弧段（图 9.11-46c)。

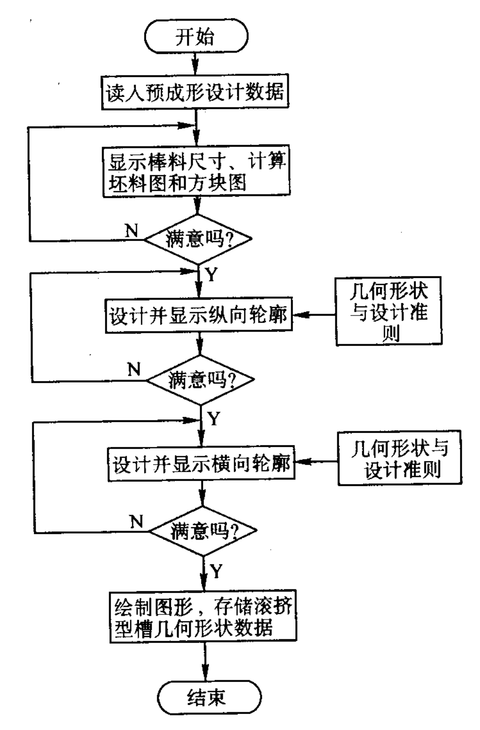


图 9.11-45　滚挤型槽设计的流程图

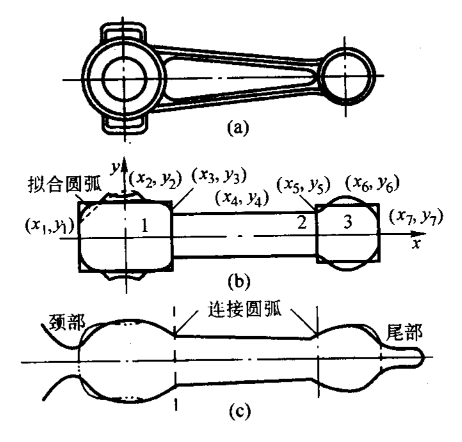
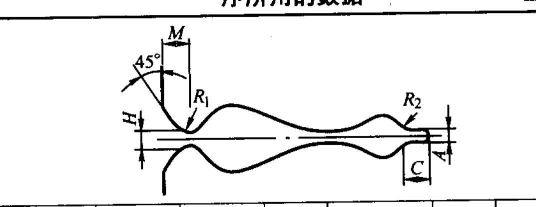


图 9.11-46　设计滚挤型槽本体轮廓的过程

在设计滚挤型槽钳口和尾部的程序中，可采用表 9.11-1 所示的数据，即根据毛坯尺寸决定这两部分的尺寸。

表 9.11-1　滚挤型槽设计程序所用的数据　mm



棒料尺寸	A	C	R_2	H	R_1	M
<30	4	20	5	10 ~ 12	8	15 ~ 20
30 ~ 50	6	25	5	12 ~ 16	8	20 ~ 25
50 ~ 80	8	30	10	16 ~ 20	10	25 ~ 30
80 ~ 100	10	35	10	20 ~ 26	12	30 ~ 38
>100	12	40	10	>26	15	>38



6.5 型槽的布置

型槽在模块上的位置将直接影响锻件的质量和作用在设备上的力。如果型槽布置不当，模锻时产生的偏心载荷会使分模面产生偏移，造成锻件超差，同时会加速滑块的磨损。在模块上布置多个型槽时，通常需权衡各种因素，尽量使载荷中心与滑块中心靠近，减小偏心载荷。

从生产率的角度考虑，应按照锻件工步的顺序布置型槽，使锻件传送的距离最短。但是，通常的做法是将终锻型槽布置在模块的中心附近，使载荷中心接近滑块中心。图 9.11-47 为多型槽的布置情况，制坯型槽分置两边，载荷较大的终锻型槽和预锻型槽安排在中间。终锻型槽比预锻型槽更接近模块中心，因为前者的压力比后者大。

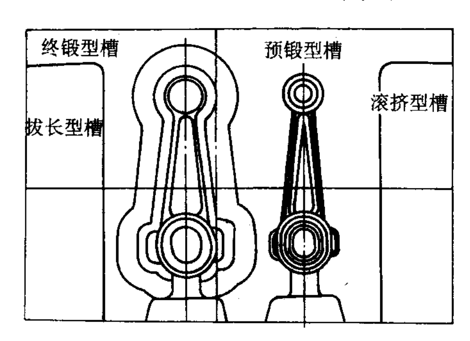


图 9.11-47　多型槽的布置

布置型槽时用到的信息包括锻造工序、打击能量、飞边槽尺寸和毛坯尺寸。此外，各个型槽的轮廓形状和几何尺寸也是型槽布置程序的输入信息。图 9.11-48 为型槽布置程序的流程图。型槽布置完毕后，显示设计结果，除图形外还包括模块尺寸、承压面积、各型槽相对于燕尾中心和键槽中心的位置尺寸。设计人员可以修改设计结果，直至满意为止。最终设计结果保存在文件中，并可输出型槽布置图。

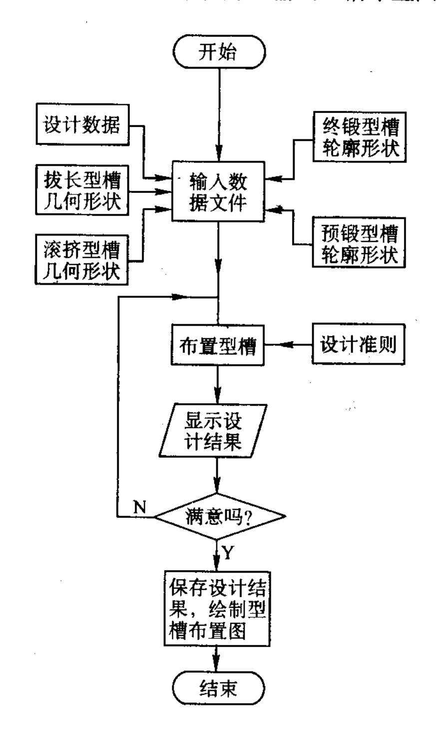


图 9.11-48　型槽布置的流程图

在布置型槽的程序中，压力中心的计算是比较重要的一部分。在计算压力中心时，通常使用以下几种方法。

6.5.1　质心或轮廓线中心法

这种计算方法认为压力中心和锻件的质心重合。当锻件形状复杂时计算比较麻烦，所以常用轮廓线的中心作为压力中心。如锻件在厚度方向的尺寸变化不大，则用水平投影的轮廓线进行计算（图 9.11-49a）。若厚度尺寸变化大，则用垂直方向的投影计算（图 9.11-49b）。一般说来，用这种方法求得的压力中心有较大的误差。

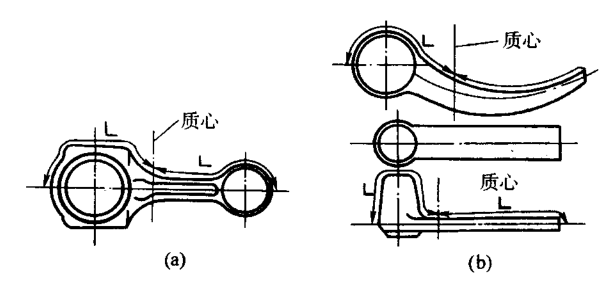


图 9.11-49　用质心或轮廓线中心法确定压力中心

6.5.2　平衡点法

这种方法在计算时，沿长度方向划分为若干部分（图 9.11-50），每一部分的“向量” V 定义为

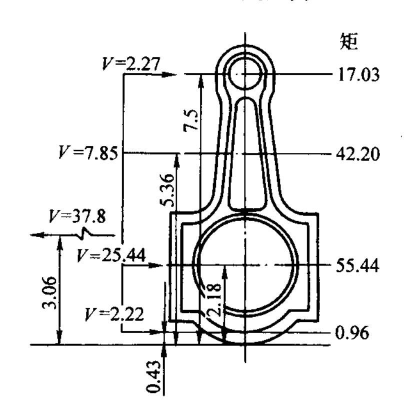


图 9.11-50　确定压力中心的平衡点法

$$V = A\sqrt{\frac{W}{T}}$$

式中，A 为投影面积；W 为平均宽度；T 为平均厚度。

“向量”和作用点距离的乘积为“矩”，平衡点，可用下式求得

$$平衡点 = \frac{\sum 矩}{\sum 向量}$$

对于复杂的锻件，计算时应划分较多段数。这种方法的计算精度与划分的段数、平均宽度和厚度的计算有关。实际应用表明，用平衡点法得到的结果比较准确。

6.5.3　主应力法

将锻件分解为具有一定变形方式的若干区域，分别对每一变形区求解，计算出各部分的压力中心。然后，用力矩平衡法可以计算出整个型槽的压力中心。

在上述求压力中心的方法中，平衡点法和主应力法比较准确，计算结果与实际情况接近。主应力法的优点在于可同时求得锻造载荷。

7　飞边槽尺寸和飞边金属消耗的计算

7.1　飞边槽桥部尺寸的算法

图 9.11-51 中显示出了常用的飞边槽形状，系由桥部 1



和仓部 2 组成。仓部的作用是容纳过剩的金属。正确地设计飞边槽桥部尺寸对保证金属充满型槽、降低金属消耗和减少模具磨损有着重要意义。

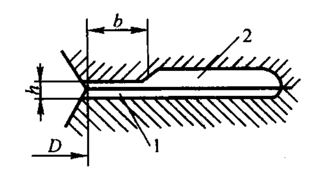


图 9.11-51 飞边槽的形状
1—桥部；2—仓部

在手工设计锻模时，不同国家、不同企业采用的设计准则往往都不同。

例如，我国的一些工厂按锻锤的落下部分重量或压力机的吨位决定桥部尺寸。这种方法没有考虑锻件和毛坯的形状复杂性。同一锻件往往能够在不同的设备上锻造，但所需压力值是不会改变的。按这种方法，如果所选择的设备吨位小，h 也会减小，这显然是不合理的。

捷捷林在研究锻模 CAD 时，利用数理统计的方法导出了计算飞边槽桥部尺寸的算法。

他对 240 多种锤上模锻资料进行了统计分析。对诸因素统计数据的分布进行分析的结果表明，桥部厚度 h 与锻件的轮廓尺寸和重量有关。对桥部厚度和锻件重量、锻件最大直径进行相关分析，结果表明锻件重量 $Q_{锻}$（kg）能最好地反映计算桥部厚度用的未知关系式。利用回归分析方法，得到计算桥部厚度 h（mm）的关系式

$$h = -0.09\ \text{mm} + 2\sqrt[3]{Q_{锻}} - 0.01Q_{锻}$$

在确定 h 后，计算尺寸 b 应保证金属完全充满型槽所必需的压力。b/h 的值愈大，金属向飞边流动的阻力就愈大。对锤上模锻的统计资料进行相关和回归分析，得到如下关系式：

$$\frac{b}{h} = -0.02\ \text{mm} + 0.003\,8S\frac{D_0}{h} + \frac{4.93}{Q_{锻}^{0.2}}$$

式中，S 为形状复杂性系数；D_0 为毛坯的最大直径。

通过类似的方法得到的用于热模锻压力机的关系式为

$$h = 2.17\ \text{mm} + 1.39Q_{锻}^{0.2}$$

$$\frac{b}{h} = -1.985 + 5.258Q_{锻}^{-0.1} + 2.56\times10^{-2}\frac{D_0}{h}$$

这些公式不仅可用于轴对称锻件，也可用于形状更为复杂的锻件，例如具有薄肋的锻件和汽轮机叶片等。

7.2 飞边金属消耗的算法

在计算毛坯重量时，应考虑飞边金属消耗和加热时的烧损。

手工设计时采用的估算飞边金属消耗的经验方法，没有充分考虑毛坯形状复杂性、分模面位置和飞边桥部尺寸等因素的影响。虽然也有的锻模 CAD/CAM 系统在确定飞边金属消耗时采用的是一些粗略的经验公式，但是为了充分体现计算机辅助设计的优越性，有必要建立计算飞边金属消耗的可靠算法。

飞边金属的消耗取决于锻件和毛坯的形状复杂性、分模面位置和飞边桥部尺寸。另外，锻件重量愈大，飞边金属消耗也愈多。

回归分析的结果得到了以下关系式：

$$\frac{Q_{飞}}{Q_{锻}} = -0.012 + 0.169Q_{锻}^{-0.2} + 0.011S\left(\frac{D_0}{D_{锻}}\right)^2 - 0.011\frac{b}{h}$$

式中，$Q_{飞}$ 和 $Q_{锻}$ 分别为飞边和锻件的重量，其余参数如前述。

对于内外分模面有偏移的锻件（图 9.11-52），应考虑内外分模面的偏移和毛坯在锻模中的原始位置。定义

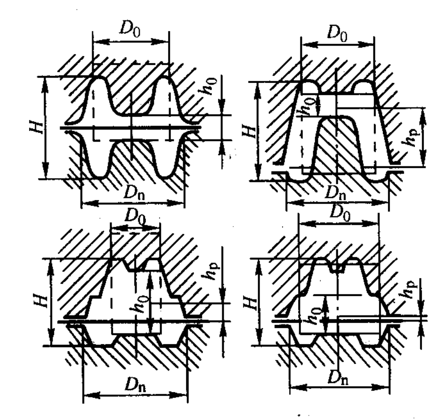


图 9.11-52 内外分模面的相对偏移

$$\gamma = \frac{H}{h_0 + h_p}$$

式中，H 为锻件的高度；h_0 为锻模闭合时上、下模两平面间的最小距离，毛坯在原始位置时紧靠这两个平面；h_p 为内外分模面之间的距离。

设 $T = S(D_0/D_{锻})^2\gamma^2$，回归分析结果得

$$\frac{Q_{飞}}{Q_{锻}} = -0.54 + 15.44Q_{锻}^{-0.2} + 0.117\times TQ_{锻}^{-0.2} - 0.013\,83\frac{b}{h}T - 0.703\frac{b}{h}$$

用类似的分析方法得到的热模锻压力机上飞边金属消耗的计算式为

$$\frac{Q_{飞}}{Q_{锻}} = -0.680 + 12.30Q_{锻}^{-0.2} - 0.022T + 0.077\,7Q_{锻}^{-0.2} - 0.130T^{0.5}$$

上述算法的计算结果和试验所得的最优数据相吻合。设计的锻模不仅可以保证金属充满型槽，而且减少了飞边金属消耗。

由于上述设计飞边尺寸和计算飞边金属消耗算法先进且可靠，故其在锻模 CAD/CAM 中得到了较广泛的应用。

8 预锻型槽的设计

预锻工序的目的是分配金属，形成中间过渡形状。设计合理的预锻模有利于金属在终锻时充满型槽，生产出无缺陷的锻件；有利于减少飞边损失；还可减少金属在终锻型槽中的流动，从而减少模具的磨损。此外，预锻提供了合理的变形量和金属流动，有利于获得理想的锻件性能。在很多情况下，预锻模设计是否合理决定着模锻工艺的成败。预锻模设计是锻模 CAD/CAM 软件的重要组成部分。

8.1 预锻型槽的设计规则

在设计模锻工艺时，是否采用预锻取决于以下因素。

1）锻造设备的能力不足以由原始坯料一次锻出锻件，这时应采用预锻。

2）对于形状复杂的锻件，即使设备能力足够，如不采用预锻，会造成型腔的角部、筋部等位置不能充满。这时须采用预锻，使金属成形时易于向难填充的部位流动。

3）当采用一次或多次预锻时，由于终锻模的使用寿命

延长或原材料节省而产生的经济效益，有可能补偿额外的模具制造费、锻件运输费和其他费用。因此，设计时应综合考虑生产批量和终锻模的使用寿命。

在手工设计中，预锻模的设计在很大程度上取决于设计人员的经验和技巧。设计预锻模的经验准则可归纳为以下几点。

1）预锻型槽和终锻型槽的横截面相等。

2）预锻型槽截面的横向尺寸应比终锻型槽窄一些，以利预锻件在终锻型槽中的放置。

3）为有利于金属的流动，预锻型槽应有较大的圆角半径。

4）为有利于金属向筋部流动，应提供由腹板中心向肋部的开口斜度。

5）对于具有较高凸台或筋部的锻件，常将预锻模相应部位的宽度减小，高度增加，而将腹板厚度加大。

6）对于钢锻件，只要可能，应设计预锻模的筋部截面，使其在终锻时以镦粗方式变形，减少模具磨损。

8.2 预锻型槽截面的设计方法

预锻型槽的设计主要是以锻件的截面为基础进行的。对于轴对称锻件，可取其轴截面；对于长杆类锻件，则需选取一系列有代表性的截面。

图 9.11-53 为长杆类锻模设计预锻型槽截面程序的流程图。程序首先将锻件的形状显示出来，并要求设计人员选择一些具有代表性截面。然后，逐个设计预锻型槽各截面。最后，在此基础上组合为预锻型槽的形状。

这里，介绍设计预锻型槽截面的两种方法。

8.2.1 H形截面预锻型槽设计方法

在设计 H 形截面预锻型槽时，根据肋板高与宽的比值可将截面分为三种，这三种截面及其预成形的设计表示在图 9.11-54 中。这些预锻模形状被广泛采用，并为设计复杂的预锻模提供了基础。但是，这种方法缺少定量的计算，因此设计时需要相当的经验。

有人提出了 H 形截面预锻型槽的定量计算方法。按照肋板的高宽比 H_f/W_f，这种计算方法可分为两种情况（图 9.11-55）。

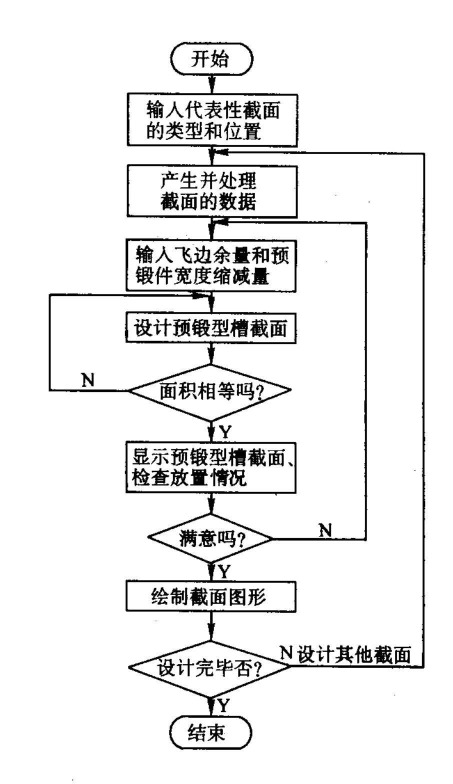


图 9.11-53 预锻型槽截面设计流程图

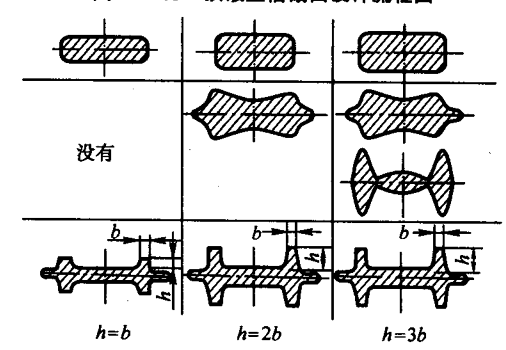
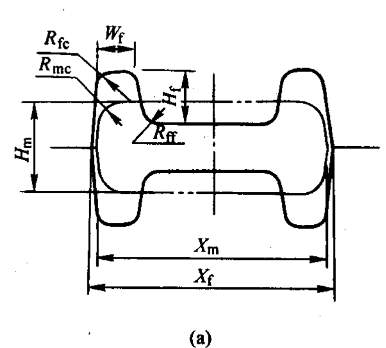


图 9.11-54 常用的设计 H 形截面预锻型槽的方法



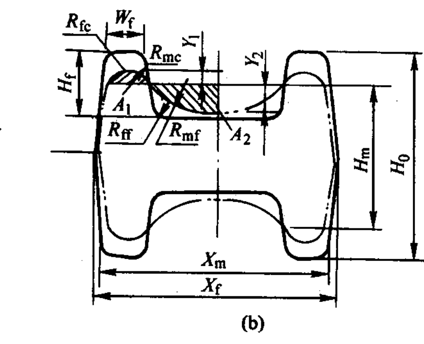


图 9.11-55 一种设计 H 形断面预锻型槽的计算方法

1）$\frac{H_f}{W_f} \leqslant 2$ 时（图 9.11-55a），预锻型槽的顶部和底部为平面，截面宽度

$$X_m = X_f - C$$

式中，X_f 为终锻模截面宽度；C 为数值，取 2～10 mm，由设计人员选取。

预锻型槽的外圆角半径 R_{mc} 和内圆角半径 R_{mf} 分别为

$$R_{mc} = 1.25R_{fc} + 3.2\ \text{mm},\quad R_{mf} = 1.25R_{ff} + 3.2\ \text{mm}$$

截面的高度按照面积相等的原则求取。

2）$\frac{H_f}{W_f} > 2$ 时（图 9.11-55b），R_{mc}、R_{mf} 和截面的平均高度 H_m 均可按上述方法求得。尺寸 Y_1 由下式计算，

$$Y_1 = 0.25\ (H_0 - H_m)$$

尺寸 Y_2 由面积 A_1 和 A_2 相等的关系求得。

8.2.2 用指数曲线定义预锻型槽截面形状的方法

用指数曲线定义预锻型槽截面形状的方法在锻模计算机辅助设计中应用较多。使用这种方法设计预锻型槽截面时，须将截面分解为若干 L 形单元进行处理。

美国阿格曼和阿尔坦等人基于指数曲线设计方法和对金属流动的理论分析，提出了确定 L 形单元形状的计算公式。首先将截面分解为 L 形单元（图 9.11-56），然后根据截面所在的变形区域确定 L 形单元的轮廓形状。

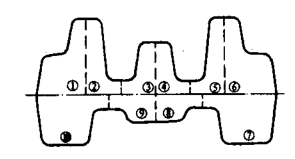


图 9.11-56　将截面分解为 L 形单元

当截面处于平面应变区域时（图 9.11-57），指数曲线为

$$x = L\left[\ln\left(\frac{y}{h}\right) + 1\right]$$

当截面处于轴对称变形区域时，则

$$x = L\left[0.5\ln\left(\frac{y}{h}\right) + 1\right]$$

程序用不同的计算公式设计不同变形区域的预锻型槽截面形状，整个截面的形状是由各 L 单元组合而成。图 9.11-58 为用上述方法设计的预锻型槽与终锻型槽的截面形状。

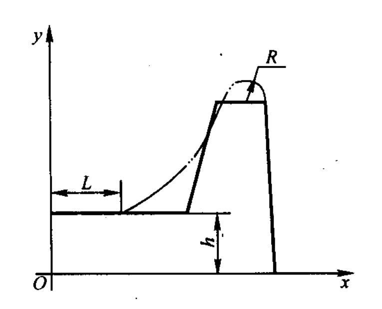


图 9.11-57　处理 L 形单元的方法

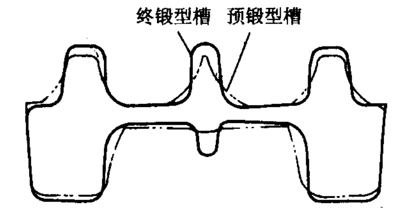


图 9.11-58　预锻型槽与终锻型槽

编写：李志刚（华中科技大学）

第12章 CAD/CAM的新发展

1 计算机辅助技术的集成

CAD、CAM等计算机辅助技术正在塑性成形领域内，对其生产模式和人才知识结构等产生重大影响，并奠定了塑性加工企业信息化的基础。

塑性成形工艺及装备的设计过程是一个相关信息产生、处理、交换和管理的过程。计算机辅助技术不是传统设计、制造流程和方法的简单映像，也不是局限于在个别步骤或环节中部分地使用计算机作为工具，而是以现代的科学方法为指导将计算机科学与工程领域的专业技术以及人的智慧和经验结合起来，在设计、制造的全过程中各尽所长，尽可能地利用计算机系统来完成那些重复性高、劳动量大、计算复杂以及单靠人工难以完成的工作，辅助而非代替工程技术人员完成整个过程，以获得最佳效果。在这种概念指导下，对计算机辅助系统的要求是：

1）应满足企业当前和未来的各种功能需求；

2）具有良好的软件系统结构及信息集成方式；

3）具有完成工艺过程设计、仿真分析和工装设计能力；

4）能支持面向制造的设计、面向装配的设计和并行工程等；

5）能提供重要设计环节上的工程决策支持和知识库，应用智能技术构建智能化系统；

6）具有信息共享的工程数据库和在计算机网络环境下的分布式协同设计制造功能。

为此，需要建立统一的产品模型，采用工程数据库管理产品数据，并使产品数据交换标准化，在统一的产品模型基础上建立CAD/CAPP/CAE/CAM集成的设计制造环境。

1.1 产品建模技术

随着计算机辅助技术的发展，人们不断地对产品的描述与建模问题提出了一些解决方法，例如实体建模和特征建模等。为了建立高度集成化的计算机辅助设计与制造的环境，人们提出了产品全生命周期的概念，提出了建立满足高度集成化与智能化要求的产品模型的目标。

产品模型是指产品在其生命周期中全部相关信息的集合，它以产品数据的形式存在。产品建模就是生成产品数据的过程，是产品开发活动的核心。在传统制造过程中，表达产品信息的媒体是工程图样。在以计算机为基础的现代制造系统中，表达产品信息的媒体是数据，包括产品定义信息、与产品设计和制造有关的技术、管理信息等。

产品模型的主要类型如下。

（1）基于结构的产品模型

在这种模型中，产品结构是表达的核心，采用结构材料清单、结构分类、产品结构树等表达产品结构。在一个计算机网络支持的产品设计系统中，来自不同应用系统中的产品数据可能存放在各自特定的数据库中，但可将它们按某一结构形式关联存储。有关产品的信息，如创建过程、数据、表格、功能、网络地址均可存储在基于结构的产品模型中。对某一产品结构，可用表格形式列出来自不同应用系统的有关产品信息。采用这种方法，只能依据产品结构描述表访问应用程序的数据库。在这种设计环境中，由于需要将不同应用系统的某些功能模块集成起来使用，不可避免地会造成大量数据冗余。虽然该方法存在一些缺陷，但它奠定了集成产品模型研究开发的基础。

（2）基于几何的产品模型

在计算机内部用几何模型表达产品的几何形状，如线框模型、表面模型、实体模型及混合模型等都属于这一类型。几何模型作为CAD系统的基础部分已广泛应用于有限元分析和数控编程等方面，但是从制造角度考虑，还有必要在几何模型中加入诸如管理属性、技术属性等信息，以扩展其表达能力。但是，由于几何模型所表达的产品几何信息是抽象的、缺少工程语义的，在表达产品非几何信息（公差和表面粗糙度等）方面则较困难。

（3）基于特征的产品模型

特征模型是为了弥补几何模型的不足而产生的，它在几何模型的基础上进一步抽取出若干高层信息，通过特征进行描述和操作，如支持概念设计的功能特征、支持详细几何设计的形状特征、支持工艺计划和加工活动的制造特征以及支持人机交互的设计特征等。

（4）基于知识的产品模型

基于知识的产品模型的特点是综合应用了智能技术、面向对象编程等。人工智能的应用使之能够存储人类专家关于产品设计、工艺和工厂环境等方面的知识和经验。因此，基于知识的产品模型的最大特点是能保存前人的知识，对产品或过程的抽象分类和校核。目前，自动处理各种应用系统的知识仍然是一个有待研究的课题，但基于知识的产品模型及其应用将扩大产品模型对各种信息的支持。

（5）集成产品模型

集成产品模型是完整意义上的产品信息模型，它是对几何模型、特征模型及其他建模技术的进一步综合和扩展。这里的“集成”是指为了支持集成设计制造环境对产品信息的综合处理，对产品生命周期内所有信息的集成，包括产品设计、计划、加工和检验等方面的描述信息，同时还包括了信息产生的环境和知识等外部过程信息。

1.2 CAD/CAM系统中的产品数据交换

产品数据是指定义零部件或构件所需要的几何、拓扑、公差、关系、性能和属性等数据，它不仅包括产品模型的几何图形数据，还包括制造特征、尺寸公差、材料特性、表面处理等非几何数据，如产品几何描述（线框表示、几何表示、实体表示以及拓扑、成形及展开等）、产品特性（如长、宽等体特征和孔槽等面特征）、公差（尺寸公差与形位公差）、表面处理（如喷涂）、材料（如类型、品种、强度、硬度等设计说明）、总图说明、产品控制信息及其他信息（如加工、工艺装配）等。

产品数据交换标准是与硬件设备无关的通用标准化软件接口，可用于不同的CAD/CAM系统之间实现信息共享，以及内部信息集成。目前实现的图形交换标准包括GKS、PHIGS和Open GL、图形数据交换标准IGES，以及产品数据交换标准STEP等。

在企业内部、企业及其协作伙伴之间实现产品数据的共享与交换至关重要。国际标准化组织制定了STEP标准（STandard for the Exchange of Product model data），其目的就是提供一种机制，描述产品生命周期内的各种产品数据，用于支持产品生命周期内多种业务活动，为建立产品数据库和产品文档提供基础。

产品数据交换标准STEP从多种角度对产品的综合属性作了定义，提供了一种不依赖于具体系统的中性机制，规定



了产品设计、开发、制造等产品生命全周期中所包含的各种信息，如产品形状、解析模型、材料、加工方法、组装分解顺序、检验测试等必要的数据定义和交换的描述。可以说，STEP 是基于集成的产品信息模型，为并行设计中的计算机辅助技术提供了产品数据共享的基础。

如图 9.12-1 所示，STEP 包括一个由应用层、逻辑层和物理层构成的三层模式结构，以及参照模型（Reference Model）和形式定义语言（Formal Definition Language）。

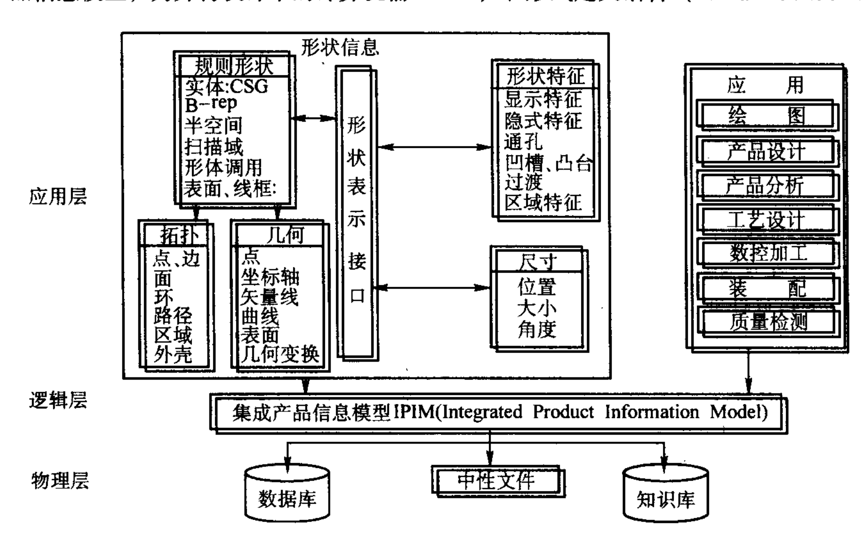


图 9.12-1 STEP 的三层结构

1）应用层采用形式定义语言描述各应用领域的需求模型，支持以 IDEF0 方法为基础的功能分析，并在此基础上设计产品数据模型。产品设计数据模型可使用 IDEF1X 和 EXPRESS-G 等数据分析和设计方法。

2）逻辑层对这些需求模型进行分析，找出共同点，协调冲突，形成统一的、不矛盾的集成产品信息模型，也称为概念模式，用于生成形式化的规格说明。STEP 数据模型的形式化规格说明相当于定义概念模型。采用建模语言 EXPRESS，它独立于数据结构模型。

3）物理层用于导出和指明形式化的需求规格的实施机制，目前已定义了该层物理文件和对数据库的标准数据存取界面（SDAI）。

使用三级模式设计语言模型时，首先通过功能分析导出形式化的需求规格说明，然后根据形式化的需求规格说明，导出面向实施的规格说明。这种模式使 STEP 独立于应用，独立于计算机系统，独立于任何语法标准。

从 STEP 的层次结构可以看出，形状描述确定了产品的几何、拓扑描述的信息模型。几何模型中包括用于描述点、向量、参数化曲线和表面的对象，其中所有的曲线都有一个准确定义的参数，因而使调整曲线或确认曲线上的点成为可能。STEP 定义了 7 种不同的曲线：直线、二次曲线、B 样条曲线、修整曲线、复合曲线、偏置曲线和表面上的曲线（相贯线、截交线）。几何模型中的表面对象支持简单边界的描述实体模型，加强了通用的多项式计算与参数平面的联系。与曲线一样，所有的表面都有一个与之相应的标准化的参数。STEP 定义了 6 种表面：基本面（平面、二次曲面、环面）、旋转表面和柱面、B 样条曲面、修整曲面、偏移面及复合面。

图 9.12-2 所示是 STEP 的组成，其中主要包括描述方法（Description Methods）、集成资源（Integrated Resources）、应用协

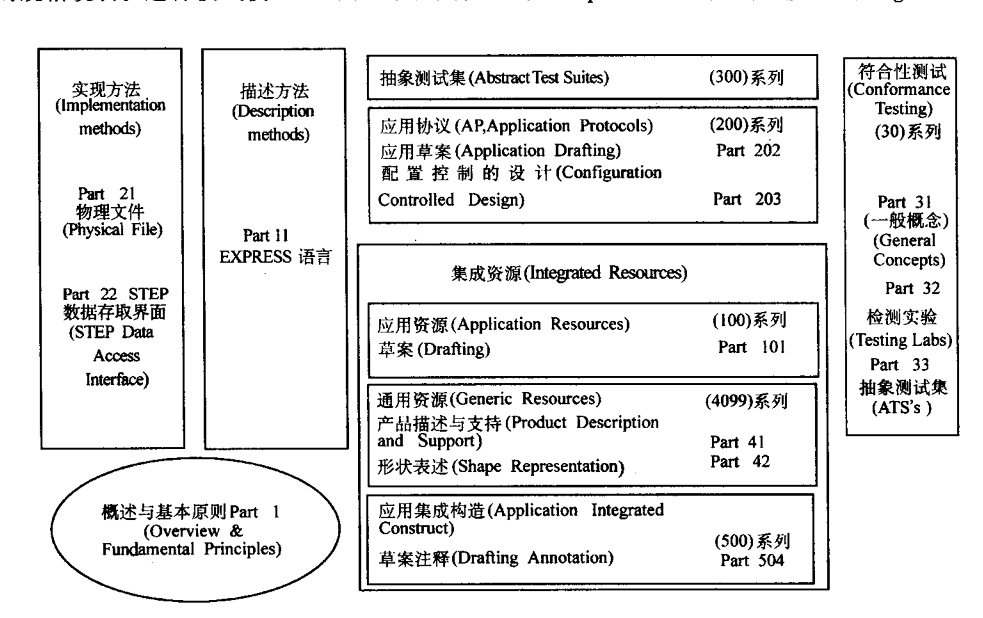


图 9.12-2 STEP 的组成

议（Application Protocols，APs）、抽象测试集（Abstract test suites）、实现方法（Implementation methods）和符合性测试（Conformance testing）。描述方法用形式语言 EXPRESS 提供具有精确性和一致性的信息描述方法。集成资源是由 EXPRESS 语言描述的具有通用性的产品数据，称为资源构件。针对某种应用选用资源构件，并对它们进行扩充来满足特定的应用需求就形成了应用协议。抽象测试集用来测试应用协议的实现是否满足一致性需求。实现方法与计算机上实现有关，包括中性文件格式、应用程序存取界面、数据库等。符合性测试的目的是验证实现方法。

1.3 CAD/CAM 的集成方法

CAD/CAM 集成包括信息集成和物理集成两个方面。前者是设计制造各部分之间的信息处理、交换与共享，后者是指设备的集成，即通过网络实现设备的互连和共享。实现 CAD/CAM 一体化的基本条件有二，一是标准的产品信息模型，二是规范的数据交换文件格式。

CAD/CAM 的集成方法主要有以下四种。

(1) 通过专用数据格式文件交换产品信息的集成

这种方式中各应用系统所建立的产品模型各不相同，相互间的数据交换需要存在于两个系统之间的转换接口程序。但是，当子系统较多时，接口程序增多，编写接口时需要了解的数据结构也较多。当一个系统的数据结构发生变化时，引起的修改量也较多。这是 CAD/CAM 系统发展初期所采用的集成方式。

(2) 通过标准数据格式的文件交换产品信息的集成（图 9.12-3）

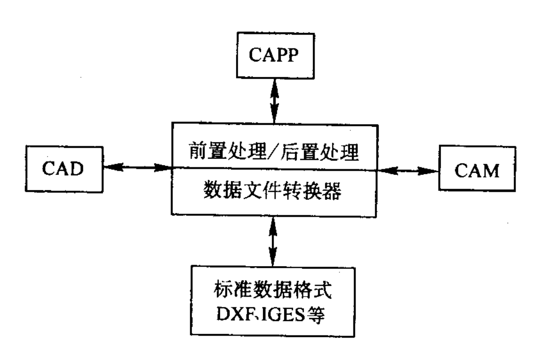


图 9.12-3 标准数据格式文件交换产品信息

这种系统采用一个与各子系统无关的标准格式，各子系统的数据通过前置处理转换成标准格式的文件，也可以通过后置处理将标准格式文件转换为本系统所需的数据。这种集成方式为系统的开发者和使用者提供了较大的方便，并降低了接口维护难度。但是，这种集成方式未能解决各子系统间模型统一的问题。

(3) 基于中性文件的集成（图 9.12-4）

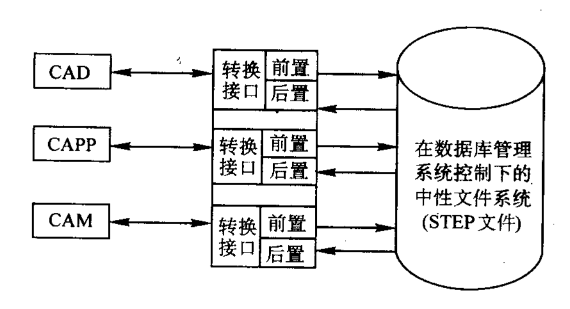


图 9.12-4 用中性文件进行连接

这仍然属于在数据文件基础上的系统集成方法。例如，如果要用 STEP 标准建立中性文件，则需要集成的各系统都必须开发用于前置和后置处理的数据转换接口。这些中性文件可以用一个通用的数据库进行管理，因此用这种方式建立起来的系统可在较广泛的范围内实现数据共享和数据的安全维护。但是，各分系统不能直接操作数据库，而必须通过各种接口来转换数据文件，这会影响数据的一致性和数据的可靠性，并会产生许多不必要的数据冗余。这是较易实现集成的有效方式，也是目前 CAD/CAM 系统中采用较多的方式。

4) 以工程数据库为核心的系统集成（图 9.12-5）

各分系统通过用户接口按工程数据库要求直接存取数据或操作数据库。在工程数据库中不仅能操作结构化数据，而且能管理各种类型的非结构化数据，如 NC 代码、工程图形、知识等。各种类型的数据都由数据库管理系统直接管理，达到真正的数据一致性、准确性、及时性和共享性，并可对系统数据实现统一维护和根据工作需要及时更新，完全避免了不必要的数据冗余、矛盾和冲突。但是，目前还没有一个完全适合于这些要求的工程数据库产品。

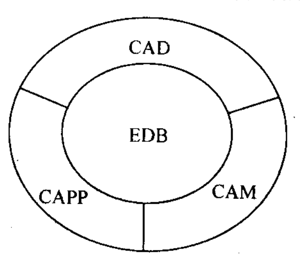


图 9.12-5 以工程数据库为核心的集成

正在进行的研究工作是按 STEP 标准采用 EXPRESS 语言开发面向复杂对象的工程数据模型，或在原有的关系数据库基础上加以改造和扩充以满足上述对工程数据库的要求。

基于网络的 CAD/CAM 集成系统是技术发展的必然趋势。因此，构建一个集分布式操作、图形化用户接口及数据库管理为一体的企业内联网将有助于充分利用企业已有的硬软件资源，为各部门之间的数据及资源共享提供快速通道，并通过因特网实现与外界的信息交流。图 9.12-6 就是这样一种以产品数据管理（PDM）为核心，集成了 CAD、CAPP、CAE、CAM、MIS、MRP 等多个系统的集成系统的逻辑结构。

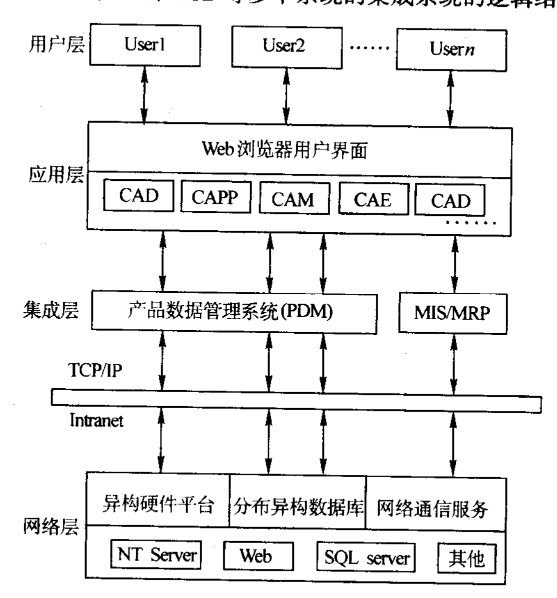


图 9.12-6 网络环境下的 CAD/CAM 集成

该系统提供了企业内部协同工作的网络环境、基于网络



浏览器的统一用户界面、以 PDM 为平台的 CAD/CAE/CAPP/CAM（C4）的集成以及 C4 系统与 MRP 系统之间的信息交换与共享。

2 协同设计

2.1 协同设计的概念

随着社会发展和技术的进步，产品生命周期越来越短，产品的多样化、客户化等要求制造业有快速开发市场需要的新产品的能力。为了满足这种需求，实现优化合理的设计，通常需要引入许多设计方法和技术。而且，一个设计问题往往含有多种不同的设计子任务和多种设计数据类型，例如产品的设计需要从产品的功能设计、产品的外观设计（工业造型）、产品的加工工艺设计、产品的成本、产品市场需求、产品的质量控制以及产品的可复用性等几方面来并行地、整体地、综合地考虑。这一设计过程所涉及到的内容覆盖了产品相关的各个领域和相应的专业知识。显然，要很好地完成同一设计过程，组建一个团队（设计小组）协同工作是合理的、必要的。

协同设计（Collaborative Design）是设计师们为了一致的目标而分工协同的设计组织模式。计算机网络技术和计算机支持的协同工作技术（Computer Supported Cooperative Work，CSCW）的迅速发展为协同设计提供了技术上的支持，这里所谈的协同设计指的是计算机支持环境下的协同设计。

协同设计至今尚无统一的定义，但人们普遍同意下述的观点，即为了完成某一设计目标，由两个或两个以上的设计主体，通过一定的信息交换和相互协同机制，分别以不同的设计任务共同完成同一设计目标。协同设计具有以下几个特点。

1）多主体性　即指由两个或两个以上设计者参与的设计，而这些设计者通常是相互独立的，并且各自具有领域知识、经验和一定的问题求解能力。

2）协同性　具有一种协同各个设计专家以完成共同设计目标的机制，这一机制则包括各设计专家间的通信协议、通信结构、冲突检测和仲裁机制。

3）共同性　多设计者要实现的设计目标是共同的，而且他们所处的设计环境也是一致的。

4）灵活性　参与设计专家的数目，可以动态地增加或减少，而且协同设计的体系机构也是灵活的、可变的。

协同设计是一个“知识共享和集成”的过程。参与共同设计的专家们必须共享数据、信息和知识。在协同设计中，信息与知识共享是极其重要的，建立公共的知识是实现这一共享的有效途径。借助于类似于电子会议的系统，可支持各设计专家的共同合作的设计过程。

与协同设计术语有关的概念与术语有：分布式设计、多 agent 设计、并行设计、计算机支持的协作设计、综合设计、合作设计等。这些术语与蕴含的概念有相似之处，分布式设计（Distributed Design）是从分布式计算系统转化而来的，它将分布式设计问题视为一个特殊形式的分布式设计系统；多 agent 设计（或称多主体设计）是从分布式人工智能中多 agent 系统中发展而来的概念，它强调了多个智能体间的设计；并行设计（Concurrent Design）是从并行工程的大背景中形成的，它强调了在工程应用中设计的并行性；计算机支持的协作设计（CSCD）是应用 CSCW 理论和技术于设计问题形成的一个专用术语；综合设计是综合多个设计源的一种设计方法，它强调了设计源和方案的一种综合形式；合作设计（Cooperative Design）则是协同设计的另一名称。

协同设计是由一组设计者（Agents）组成的设计团队（Design Team），经过完成一些协同任务（Collaborative Tasks）来实现设计目标或项目。这些设计主体具有如下特点：

1）每一个设计专家具有一个通信模块、一组问题求解方法和知识簇，可通过一组规划步骤来实现自身的目标；

2）设计者之间可以通过通信机制来交换信息。

协同设计中的协同任务分别是会议任务、共同工作任务、信息交换任务和管理任务。会议任务（Conference Tasks）是任何两个或两个以上设计者的经验和知识的交流，通过讨论形成协商、观点产生、问题求解、简化任务等。会议任务既可以是同步的，也可以是异步的；既可以是形式化的，也可以是非形式化的。这种任务在分布式环境中，可以通过电子会议系统或电子邮件系统来支持。共同工作任务（Co—working）指各设计者同步或异步地协同产生的一些文档和产品设计。信息交换任务（Information Exchange Tasks），为两个或两个以上的设计专家之间的文档或信息的交换。在分布式环境中，这些协同任务由分布式数据库、文本库和设计记录维护设施来实现。管理任务（Management Tasks）则包括设计的协调和指导等事务，如规划、调度和监控等。

协同设计过程是各设计者通过各种协同任务完成的，整个设计过程包括设计问题形成、设计问题理解，设计解产生和设计解选择与优化等设计任务。

2.2 协同设计的关键技术

（1）通信机制与网络环境

由于协同设计是经多个设计专家共同协商和协同，共同完成某一设计任务的过程，并且允许多个设计专家使用各自专业或领域的术语和表达结构，因此，如何为多个设计专家提供适宜的表达机制和通信语言机制，为多专家的异质知识的共享、交换和集成提供有效的设施，这是协同设计过程要解决的问题之一。

支持专家间合理有效通信的体系结构是对任何一个分布式系统都十分关键的问题。有效的体系结构和通信协议可以降低协同设计的复杂度，是真正实现知识集成和交换的关键。

产品开发团队利用计算机网络开展工作，进行密切的设计协同。产品协同设计涉及的任务、人员和工具多，设计信息多种多样，通过计算机网络可将协同设计中特定类型的信息，如数据、文本、图像和声音等，在正确的时刻，以正确的方式，传递给适当的人，有力地支持协同设计。

（2）异构知识表达及其语义一致化

信息共享和决策是大型产品开发的协同设计的重要问题。在大型产品协同式开发环境中，各设计小组需要存取或获取其他小组所产生的设计决策、设计方案，甚至某些设计知识，以便能够达到共同的设计目标；同样地，他们的设计过程也受其他小组所产生的某些工程参数的影响，导致设计过程的进程加快或减慢，或重新设计。因此，协同设计中信息与知识的频繁交换使设计问题的复杂度增加，会直接影响协同设计的效率。

协同设计中，原则上允许参加协同设计的各设计主体具有各自不同的知识表达机制和术语概念体系，在具体的实现中，往往是将各种独立的表达机制和语言系统集成在一个松散的协同设计环境中。如何实现这些具有不同表达机制的系统之间有效的信息交换是提高设计质量的关键。不同的知识表达机制和术语概念系统，给协同设计间信息和知识交换造成了在语法转换和语义一致化上的困难。

实现协同设计计算环境的知识表达框架有三种类型：第一种是各 Agent 设计小组采用统一的知识表达机制与语言，称之为同质知识表达机制；第二种是允许各 Agent 设计小组采用不同的知识表达系统与语言，并通过统一通信语言和公共术语体系来实现各 Agents 间的知识交换与通信，称之为异

构知识表达的包装实现模式；第三种称为异构知识表达的转换实现模式，即允许 Agents 各自使用不同的表达机制与语言，并通过互译的通信语言实现语法和语义上的一致。

异构知识表达在协同设计的计算环境中，需要满足下面的实际需求。

1）协同设计的表达应提供共享设计知识的表达机制，以支持不同的设计小组或系统能够在一个公共概念化的体系中判断和交换信息与知识。

2）协同设计必须能够提供外部异构数据的兼容表达格式。一种有效的方法是提供标准化的、公共的数据格式，例如 STEP 标准中的 EXPRESS 语言。

3）协同设计系统应同时考虑结构化信息与非结构化信息的表达，例如应支持图文共存的信息、仿真数据表达等。半结构表达是一种有前途的表达方法。

4）协同设计系统应支持信息事务表达和设计变化事件触发的例程表达。

（3）冲突检测与消解

协同设计是多个设计主体参与的设计过程。在这一设计过程中，各主体之间的设计目标、方案和对象往往存在冲突和矛盾。因此，冲突检测和消解成为协同设计的另一关键问题。

运用系统或领域内的经验知识来检测和解决发生在设计组间的冲突是可行的。依据冲突知识的作用，可分为冲突检测知识和冲突消解知识；依据冲突知识的特点，又可分为隐含的冲突知识和显式的冲突知识，后一类知识是指能显式表达并能被系统显式运用的那些冲突知识。

冲突的类型包括竞争式冲突模式与合作式冲突模式。前者是各设计人员各自考虑自身的利益；后者是合作的各设计小组协同其设计目标以达到其全局的优化的解。在协同设计中，主要考虑的是合作式冲突模式。

冲突检测方法大致上可以分为领域无关方法和领域相关方法。例如，不可满足约束集检测、基于 Petri 网点的冲突检测、基于真值的冲突检测方法等都是领域无关的，而领域相关的检测方法，则是利用领域的知识来判断冲突是否发生。

常用的冲突消解可分为面向状态的和面向数值的两类。前者设计目标的状态是可识别的，目标状态或者可以达到，或是不可达到的，可以看成是一种硬约束。在协同设计领域中，冲突的产生更多是由软约束引起的，软约束可以被放宽以满足其他更重要的设计约束，一般用它来表示对某一特定设计属性的重视程度，往往用一个函数值来衡量这种程度和评价设计状态的优劣，这个函数可以是全局的也可以是局部的。面向数值的方法主要是处理这种软约束引起的冲突。

在冲突消解过程中，根据不同的冲突情况可以采用多种解决策略，策略的选取不是简单的过程，其本身就可以看作是基于知识的问题。在协同设计中，由于各主体的能力、作用、目标等不同，当一种冲突消解策略达不到满意的效果时，系统必须有一定的机制采取其他更理想的策略。协商冲突消解是近年来引起人们广泛关注的一种更具前途的冲突消解策略。

协商是协作求解问题最常用的方法之一，当设计者持有不同的观点、看法或出现严重分歧时，往往可通过协商来解决分歧。一般的协商过程如下。

1）分歧的甲方根据自身知识提出一种解决冲突的方案。

2）乙方经权衡后决定是否接受这一方案。若无异议，双方达成一致。

3）若乙方认为甲方提出的方案与自己的方案相差甚远，双方根本没有调和的余地，它可以拒绝接受甲方的方案。这时双方只有谋求其他的分歧解决方法，如通过权威仲裁和协调。

4）若乙方能部分地接受甲方的方案，可对方案中自己认为不妥的地方提出新的解决方案，再征求甲方的意见。

5）通过多次协商，分歧将越来越小直至得出双方都能接受的方案为止。

由于协同设计系统的复杂性、动态性，不可能完全依赖静态定义解决主体间的冲突，而动态冲突消解策略往往有一定局限性，是与应用相关的，也不可能实现完全自动消除主体间所有可能出现的冲突，只有将动静态策略有机地结合起来才能达到较理想的效果。除兼顾冲突消解的自动化程度外，关键是要能够在系统运行过程中，逐渐地丰富系统的冲突消解知识、提高系统鲁棒性，为设计人员协商解决冲突提供有效的决策支持。在实施动静态相结合的方法时，静态冲突消解可用传统的推理方法，而动态冲突消解可采用基于事例的推理等更具开放性的方法。

2.3 系统的结构与管理

协同设计系统是由设计专家和智能主体组成的混合体。目前协同设计包括三种主流结构，即网络结构、联邦结构和面向主体的黑板结构。

1）网络结构　在网络结构中，每个主体有自己的通信接口、局域问题求解知识、其他主体模型、当前上下文模型等功能模块。这种结构允许动态地改变协同设计系统的主体组成，具有系统开放性。但每个主体除了具备领域知识外，还要包含完备的通信和控制知识，这使信息和知识的冗余较大。因此，网络结构适合于主体数量小、要求较强的系统开放性、子任务耦合松散的设计环境，如图 9.12-7 所示。

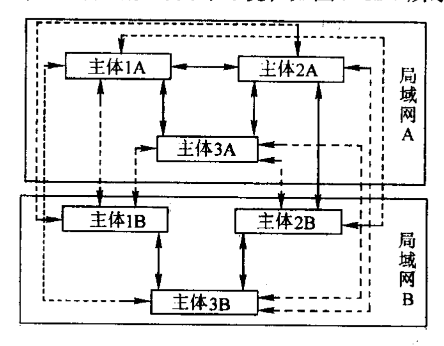


图 9.12-7　网络结构

2）联邦结构　在联邦结构中，主体间的联系和消息传递通过一个称为协调控制器的特殊主体。它是主体的神经中枢，负责协同设计组之间以及主体间的信息转换、任务的规划、分解和管理。当某一主体需要服务时，只需向协调控制器发出请求，而并不直接同其他主体发生作用。因此，联邦结构能更灵活地实施不同的通信协议，它适合于子任务耦合程度高、主体数量大、信息交换频繁的系统，如图 9.12-8 所示。

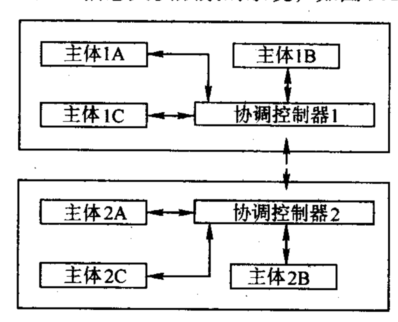


图 9.12-8　联邦结构



3）面向主体的黑板结构与联邦结构相似，主体间的相互作用也是分组管理的，两者的区别在于面向主体的黑板结构将系统的协调管理划分为几个组成部分。每个局域主体组中有一共享的称为黑板的数据存储区，用来存储设计数据和设计过程信息，主体间的物理通信是由网络管理器实现的，从而减小了协调控制器的负担，如图 9.12-9 所示。

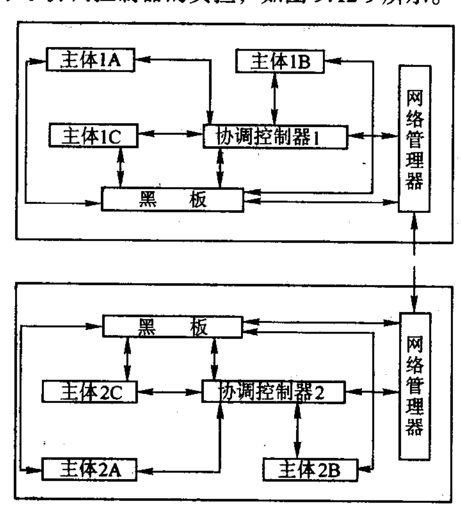


图 9.12-9 黑板结构

2.4 模具协同设计系统

2.4.1 协同设计系统的结构

图 9.12-10 所示为一模具协同设计系统的总体结构。该系统包括三个层次上的协同。

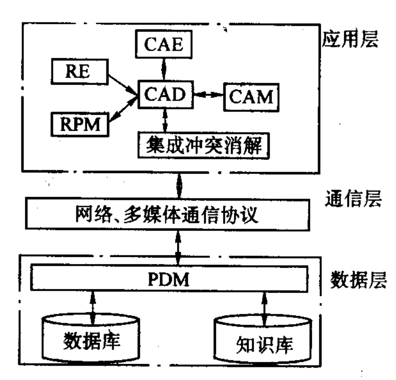


图 9.12-10 注塑模协同设计系统

1）应用层。各功能小组充分利用各自的软硬件条件，共同完成协同任务。对于既有的产品采用三坐标扫描仪获得产品数据，实现产品的反求，CAD/CAM 软件采用 UG，CAE 软件采用 Moldflow，并利用 LOM 快速原型制造设备实现产品的快速原型制造。

2）通信层。利用网络技术，实现各功能小组在协同过程中的信息交流。

3）数据层。通过统一的产品信息模型支持产品的多视图表达，满足产品的全生命周期的信息共享与应用需求，PDM 软件选用 UGS 公司的 IMAN。

2.4.2 协同过程的任务关联和分解

协同设计对产品开发的初始阶段提出了更高的要求，任务分解是协同设计的前提保证。一个模具开发对象是由一系列零部件按照一定关系组成的，其开发过程也是由不同的子过程按一定的顺序组成。任务分解就是按照一定的要求将一个任务分解成多个子任务，由多个小组协同完成。

一个任务可用符号 T_i 表示，i 是一个字符序列，反映任务的分解层次及从属关系。若一个整体任务表示为 T，则它的子任务可表示为 $T_1 \cdots T_n$，而 T_i 的子任务为 $T_{i1} \cdots T_{im}$，字符序列的长度反映了分解的层次，体现了从属关系。

在协同设计的过程中各子任务之间存在着先序、并行、并发、互斥等关系，可采用二元组进行描述：

1）先序关系 Precedence（s_i，s_j）表示以 s_j 中的任务全部完成的事件 j 发生作为 s_i 开始的前提，其中 s_i 与 s_j 均是设计任务符号序列；

2）并行关系 Parallel（t_i，t_j）表示任务 t_i 和 t_j 可以并行地进行；

3）并发关系 Concur（p_i，p_j）表示任务 p_i 和 p_j 同时进行时，有可能产生冲突；

4）互斥关系 Conflict（q_i，q_j）：表示任务 q_i 和 q_j 产生冲突，不可同时进行。

根据任务的符号定义和关系，我们可以将一个任务分解，获得一个任务关联图，如注射产品及模具的开发可以被分解为多项子任务，其任务关联图如图 9.12-11 所示。

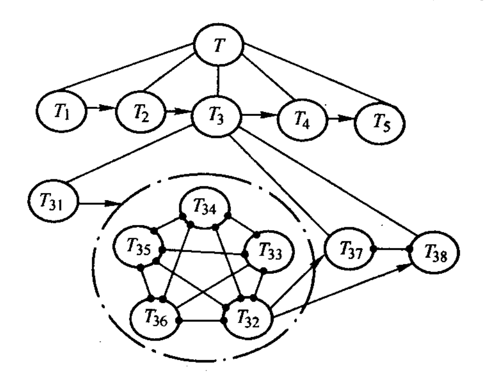


图 9.12-11 任务关联图

○ 产品开发任务 → 先序关系
— 从属关系 •—• 并发关系

T—注射产品开发 T_1—注射产品设计
T_2—注射产品分析 T_3—注射产品模具设计
T_{11}—注射模方案设计 T_{12}—注射模型腔型芯设计
T_{33}—注射模模架设计 T_{34}—注射模浇注系统设计
T_{35}—注射模温控系统设计 T_{36}—注射模辅助机构设计
T_{37}—注射模脱模机构设计 T_{38}—注射模抽芯机构设计
T_4—注射模制造 T_5—注射产品生产

2.4.3 协同设计中的约束求解

协同设计小组共同参与产品开发的过程，小组之间必然存在许多相互制约、相互依赖的关系，其中包括设计规范、设计对象的基本规律、一致性要求、当前技术水平和资源限制以及用户需求等。这些关系可以通过约束来表达。在产品开发过程中，各种约束关系交织在一起构成一个约束网络，如图 9.12-12 所示。产品设计过程的约束主要有三种类型：一是工程约束，主要用于表达设计要求和设计过程，其主要特点是过程式表达；二是几何约束，对几何实体自由度的限制，它实质上是几何实体之间关系的表达，几何约束是双向的，几何约束可分为拓扑约束、形位约束和尺寸约束；三是知识约束，主要是设计过程中的规则，可用一定的知识表达方法描述，例如用 IF—THEN 方式表达。

协同设计问题本质上是一个约束满足问题，设计过程就是根据给定功能、结构、材料及制造等方面的约束描述，求得满足设计要求的设计对象的细节。设计同时也是一个循环反复、不断完善的过程，在设计周期中产品的几何模型被反复修改。协同设计过程中的约束求解问题主要表现在两个方面：一是将设计过程中可能遇到的各种制约通过约束表达建

立约束集，然后对产品的设计进行约束检查，满足功能要求且没有约束冲突的解就是可行的设计解；二是将各协同小组间的制约和依赖进行约束表达，构筑约束空间，然后对产品进行优化求解。第一种约束求解适用于基于反馈的协同设计，第二种约束求解则适用于分解组合的约束求解。

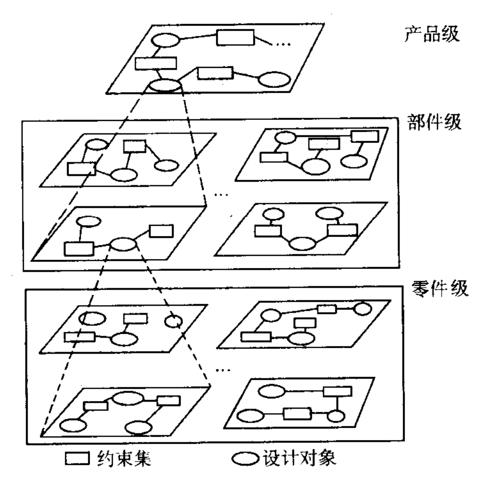


图 9.12-12 约束网络

从约束满足的角度看，产品开发过程是一个在保证各种约束满足的条件下，为实现某个指标而对所有变量进行赋值的过程，而这种赋值过程就是一个约束求解过程。协同设计各小组之间的约束是多种多样的，有确定约束，也有不确定约束，不确定约束会随着设计的进行而改变。

协同设计的约束求解不同于一般的固定约束空间的求解问题，而是在一种变化的多约束空间内对设计子问题进行求解。在问题分解后建立的设计子问题输入/输出模型中，子问题的输入就是外部约束，子问题的输出就是子问题的设计解，同时也是施加给与其有约束关系的设计子问题的外部约束。由于协同设计是一个逐步细化的设计过程，一个子问题的输入是另一个子问题的输出，因而一个子问题的求解结果直接影响其他设计子问题的外部约束。由此可见，外部约束大多是一种动约束，与其相对应的内部约束多为静约束，二者组成了一个动态的设计约束空间，子问题的设计求解就是在一个动态的约束空间约束下的优化过程，随着设计的进一步展开，会形成一个逐渐降维和缩小的约束空间，直至每一个子问题的解都能满足要求。

2.4.4 冲突消解

系统中采用的集成化的冲突消解系统模型，如图 9.12-13 所示。它是从冲突全生命周期的角度考虑，对检测到的冲突进行归档分类，根据其类型采用适当的消解策略，不同的消解策略可以相互补充。

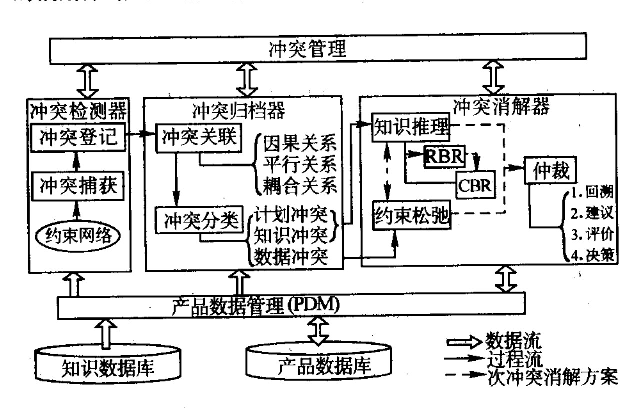


图 9.12-13 冲突消解系统模型

1) 冲突管理。管理冲突相关信息（模型、登记及刷新、冲突关联图），保存冲突消解历史，关联冲突消解知识库、实例库等。

2) 冲突检测。通过约束传播检查设计结果是否满足整个约束网络，检测设计过程中的约束违反情况，检测系统中存在的冲突，并对冲突进行登记。

3) 冲突归档。对捕获的冲突进行冲突分析，建立各冲突的关联图，冲突关联主要包括因果、平行、耦合关系。通过分析冲突关联，分清冲突的主次，主要冲突具有消解的优先权。按类型将冲突分为计划、知识、数据三类冲突，计划冲突起因于对设计任务不同的理解而引起的冲突，数据冲突是因为设计过程中缺乏数据一致性，知识冲突则是指不同领域的规则难以相互满足。冲突分类是为了根据冲突类型相应采取适当的冲突消解策略。

4) 冲突消解。冲突消解主要包括三方面：一是知识推理，采用基于规则的推理（Rule Based Reasoning，RBR）和基于事例的推理（Case Based Reasoning，CBR）两种知识推理方法，主要用于消解计划冲突或知识冲突。首先采用 RBR 的冲突消解方法，实现从冲突到冲突规则的映射，提出消解方案；对冲突关联复杂、耦合度高、难以采用 RBR 方法消解的冲突，采用 CBR 的冲突消解方法进行相似实例匹配，得到相似事例，设计者再根据具体需要改进相似事例获得设计解。二是约束松弛，对于检测到的数据冲突采用约束松弛的方法进行，用松约束来代替紧约束，例如忽略某些次要约束，重新进行设计求解。对于难以用上述方法消解的冲突，可采用仲裁方式。冲突仲裁人在综合各方建议的条件下进行决策，提出仲裁意见，消解冲突。

3 并行工程

3.1 并行工程的发展背景

随着经济全球化的进程，市场竞争日趋激烈，用户对产品的需求呈多元化和个性化，产品的更新换代加快，降低产品成本的主要手段不再仅仅是廉价的原材料和劳动力，而且是快速准确的信息和高技术含量。在这种形势下，要求企业不断变革，以缩短新产品的开发时间（T），提高产品质量（Q），降低产品成本（C），改善服务水平（S）。当今，企业之间的竞争主要是交货期、质量、成本和服务的竞争，即 TQCS 的竞争。

传统的产品开发模式为串行模式，即开发过程是按顺序从一个部门传递给后续部门，每个部门根据各自的要求或工艺特点完成其产品开发内容。这种串行的产品开发模式，导致在产品开发的早期阶段不能很好地考虑产品生命周期内的各种因素，不可避免地造成较多的返工，在很大程度上影响了 TQCS 目标的实现。

根据对各国产品开发时间的统计，英国企业在计划、准备阶段仅投入了 17% 的时间，伴随许多不成熟，甚至错误的决策，结果 50% 的时间花在返工和重新设计上。日本企业则将 66% 的时间用于计划和设计，尽量考虑到各种可能的影响，最终只需要 10% 的时间用于返工。返工次数的增多必然会增加成本，延长上市时间，削弱竞争力。图 9.12-14 揭示了影响产品开发的规律。曲线 a 显示了在产品开发过程各阶段改变产品结构、性能的难易程度；曲线 b 为各阶段工作对产品价值的影响程度；曲线 c 揭示了各阶段工作占产品开发成本的比率。

研究表明，产品开发的早期阶段决定了产品成本的 70% 以上，而这一阶段所占的开发费用仅为 7% 以下。后续环节的修改费用则是上游环节修改费用的 10 倍：如详细设计的修改费用是概念设计修改费用的 10 倍，生产工艺制造



阶段修改费用是详细设计修改费用的 10 倍。也就是说，在产品开发过程中把一个问题带入下一个环节将导致产品成本成倍提高。

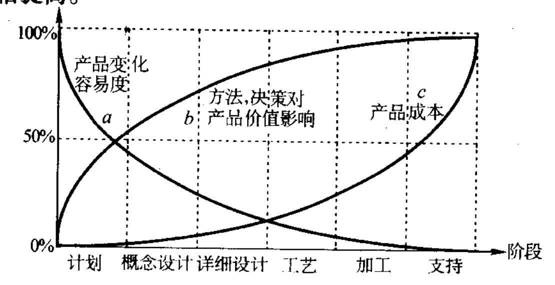


图 9.12-14 产品开发周期中价值、成本的变化

因此，在产品开发的早期阶段考虑产品生命周期中的各种因素，对企业获得最佳的 TQCS 效益至关重要。同时，产品开发需要各部门、各成员间的合作协调、共享资源、保证各个环节的工作质量。并行工程正是在这种背景下提出的。

3.2 并行工程的概念

并行工程（Concurrent Engineering，CE）也称为同时工程（Simultaneous Engineering），目前对并行工程有多种不同的定义。将这些并行工程的定义进行综合和归纳，可将并行工程的概念表述为：

并行工程是一种系统工程方法，它从产品设计、制造全过程的角度出发，打破传统组织结构带来的部门分割封闭的形式，组建多学科产品开发团队，强调参与者协同工作的效应；通过重构产品开发过程，运用先进的设计方法学，在产品开发的早期阶段就考虑到其生命周期中的所有因素，从而提高产品的质量，缩短产品开发周期，降低成本，增强企业的竞争能力。

并行工程的主要目标是：提高新产品开发全过程，包括设计、工艺、制造、销售服务等方面的质量，降低新产品生命周期的成本，包括产品设计、工艺、制造、发送、支持、客户使用乃至产品报废的成本，缩短新产品研制开发周期，包括减少设计反复，缩短设计、生产准备、制造及投放市场的时间等。

并行工程实现缩短产品开发周期、优化 TQCS 的目标，主要是通过提高产品开发早期阶段的质量和准确性，尽可能减少返工次数达到的。采用的方法是优化重组产品开发流程，强调各部门、各参与者自始至终地参与产品开发过程，在形式上表现为多项任务平行交叉地进行，在开发过程的早期阶段尽早考虑产品生命周期内的多种因素。图 9.12-15 为

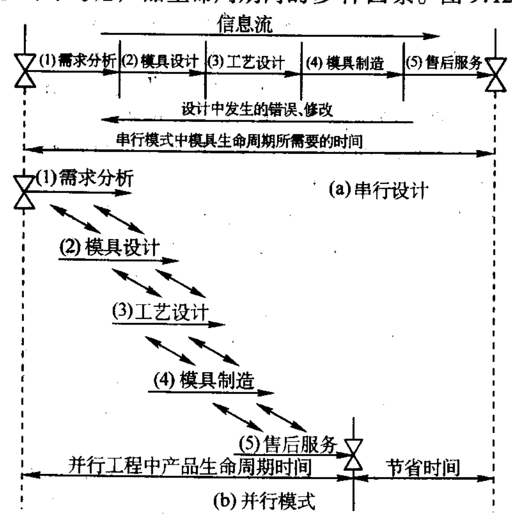


图 9.12-15 串行模式和并行模式的比较

模具的串行开发模式与并行开发模式的比较。

需要指出的是，并行工程并不意味着设计与制造的同步进行，而是要求设计的同时考虑制造中可能存在的各种因素。任何产品开发在宏观上总是串行的，只是在微观活动上可能通过过程改进和过程重组实现局部的并行。

另外，并行工程不是新的生产模式，而是新的产品开发模式，并行工程的重点是产品开发过程的集成化和并行化。

并行工程的提出不仅引起了学术界的极大兴趣，也引起企业界的高度重视。许多企业成功地实施了并行工程，并在新产品的开发中取得了良好的效果（表 9.12-1）。

表 9.12-1 采用并行工程对产品开发周期的影响

公司	产品	开发时间（年）	
		采用并行工程前	采用并行工程后
HONDA	汽车	4	2.5
AT&T	电话	2	1
NOWISTAR	卡车	4	2
HP	打印机	4.5	2

3.3 并行工程的支持系统

并行的产品开发需要在一个框架系统中进行。在该框架的支持下，并行工程技术才能在产品开发中得到充分应用。并行工程产品开发支持系统的逻辑模型如图 9.12-16 所示。

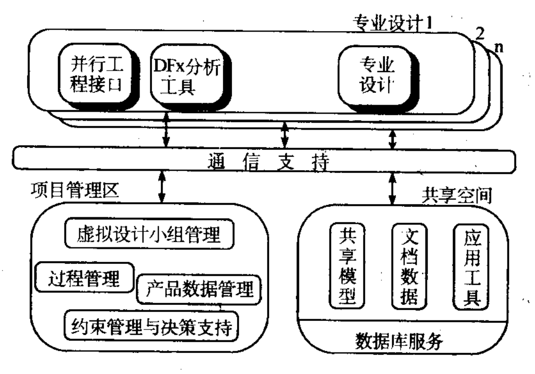


图 9.12-16 并行工程支持系统的逻辑结构

并行工程支持系统在逻辑上分为四个部分，即项目管理区，共享空间，专业设计和通信支持。

（1）项目管理区

项目管理区是并行工程支持系统的核心部分，它包含虚拟设计小组管理、过程管理、产品数据管理、约束管理与决策支持等功能。虚拟设计小组管理负责根据不同任务组织开发团队，并负责其间的协调控制；过程管理负责开发活动的分解、活动执行规划和过程的控制；产品数据管理提供结构化的方法，有效地、有规则地存取、集成、管理、控制产品数据及其使用流程。约束管理和决策支持负责在协同的开发过程中根据需要建立约束网络，实施决策。

（2）共享空间

共享空间是并行工程支持系统专门为产品开发团队提供的共享工作区，它提供需要共享的产品模型、文档、数据库服务和电子公告牌服务等，同时也保存可服务于多个开发环节的应用工具系统，如通用件库系统等。

（3）专业设计

专业设计是具有不同设计职责的成员的本地工作区，它除了专门的设计系统外，还包括并行工程应用工具，如决策支持、可制造性分析、可装配性分析等工具。并行工程支持

界面是设计者进入支持系统的连接入口，当设计者承担了开发团队的一个角色时，它在并行工程支持界面下接受统一的管理和控制。

(4) 通信支持

通信支持提供并行工程支持系统的网络通信服务，以满足工作组成员共享数据、协同设计等的需求。

3.3.1 过程管理

过程管理是并行工程工作的核心，图9.12-17描述了其组成结构，分为四个部分，即过程建模，过程分析，过程重构和活动管理。

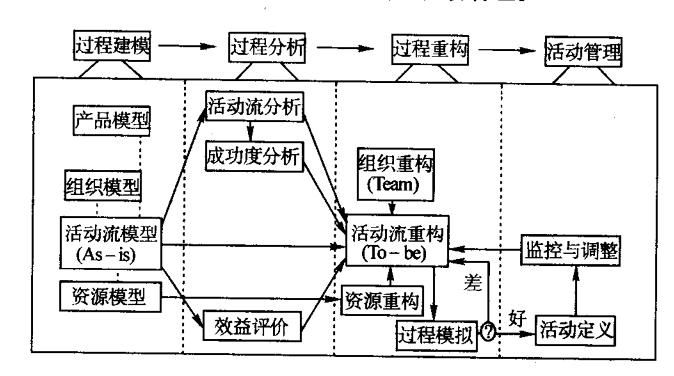


图9.12-17 过程管理的结构

1) 过程建模。建立产品、组织和资源模型，并采用合适的工具描述产品开发工作的活动流程（As-is模型）。

2) 过程分析。包括信息流分析和可靠性分析。信息流分析通过研究活动间的输入/输出关系，分析它们之间的约束、控制关系；可靠性分析从产品开发环境、设计方法、组织方式、过程并行度等方面综合估算开发过程对产品性能的影响，并作为过程重构的依据。

3) 过程重构。根据活动间的约束、控制关系，分别从活动流、组织、资源等方面对程进行重新设计。此外，为检验过程的可行性，有必要对重构后的过程进行仿真。重构后的过程称为To-be模型。

4) 活动管理。根据重构后的过程组织过程的实施，并对各成员的任务执行状态进行监控，针对异常事件调整计划。

3.3.2 组织管理

并行工程要求打破传统的、按部门划分的成员组织模式，组成以产品开发为对象的多学科产品开发团队（Integrated Product Team，IPT）。这种组织的方式强调成员的合作，使成员方便地交流意见，协同设计。组织结构的改变带来的效益表现在以下几方面。

1) 信息交流方便。工作组成员间数据、文档交流便利，可以随时了解整体进度，交换意见，及时发现问题。

2) 简化管理。专门的产品开发队伍独立于其他管理、约束（部门间、上下级间）之外，利于工作的组织、实施。

3) 职责明确。工作组成员目标明确，干扰少，可以专心致志地工作。

4) 群体决策。工作组成员来自各专业领域、多个职能部门，有利于解决各种复杂问题。

3.3.3 产品数据管理（PDM）

在并行工程产品开发过程中，产品信息是由不同的设计人员，在不同的计算机软件和硬件平台上，按照一定的设计顺序逐渐产生的。各种计算机辅助工具将产生大量的中间数据、图形、文档或资料。为了保证设计前后的一致，必须按照产品结构配置的思想，对数据、文档、任务流、版本进行全局的管理与控制。产品数据管理旨在应用结构化的方法，有效地管理和控制产品数据和管理数据的使用流程。

3.3.4 通信支持

并行工程产品开发需要可靠的通信环境，以支持客户/服务器工作模式、多媒体会议、异地IPT协作和交换信息等应用。通信支持的实现现已有成熟的商品化软件。

3.3.5 可共享的产品数据模型

为避免因模型不一致造成额外工作，并行工程应尽量采用各专业共享的产品数据模型。共享数据模型的方法有两种：1) 上层共享，不改变设计工具的数据模型，在上层建立模型间的转换映射，使数据模型在应用时保持一致性；2) 底层共享，采用一定的模型标准（如STEP）使CAD模型能够被下游过程直接读取。后者是比较理想的共享技术。由于它需要从底层做起，离普遍应用尚存在距离。

3.3.6 约束管理与决策支持

约束管理是支持并行工程的有效工具，产品开发生命周期内各因素之间存在着相互依赖、相互制约的关系，这些关系构成了约束。约束不但用于产品设计，而且应用于决策支持系统。其内容如下。

1) 约束表达，包含定义变量、约束和约束集等。

2) 约束网络，用图的形式描述约束集合中的变量和约束之间的联系，形成约束网络。一个约束网络通过变量与另一约束网络相连，构成更大的约束网络。

3) 约束检验与传递。

4) 冲突消解，常见策略有重构约束、约束分析、约束放松和延迟考虑等。

决策支持是并行工程协同工作的重要保证。决策的形式包括成员之间根据经验、知识协商，成员借助知识系统进行决策，多个知识系统协同推理、决策等。

图9.12-18所示为一并行工程支持系统的总体结构。

该系统由项目管理和客户应用支持两部分组成。项目管理部分位于项目服务器上，由六个模块组成，即系统管理模块、过程管理与控制模块、IPT组织管理模块、文档管理模块、通讯服务模块和应用工具管理模块。项目管理部分设有共享工作空间。共享工作空间保存着共享的产品模型、全局文档、通用件库等信息，为客户的应用请求提供服务。

客户应用支持部分位于参与IPT的成员一端，以Client/Server工作模式为主，其内容包括并行工程支持界面和客户应用支持模块。

1) 并行工程支持界面。它是IPT成员进入并行工程产品开发支持的入口，是连接其他成员及共享工作区的桥梁。该界面包括四个部分，即成员信息区、工作状态区、通信区和工具区。

2) 客户应用支持。它是客户端应用程序，负责成员登录的权限检查，与项目服务器建立连接，使成员能够访问共享工作空间，向项目服务器请求服务等。它是IPT成员一端



必须安装的支持模块。

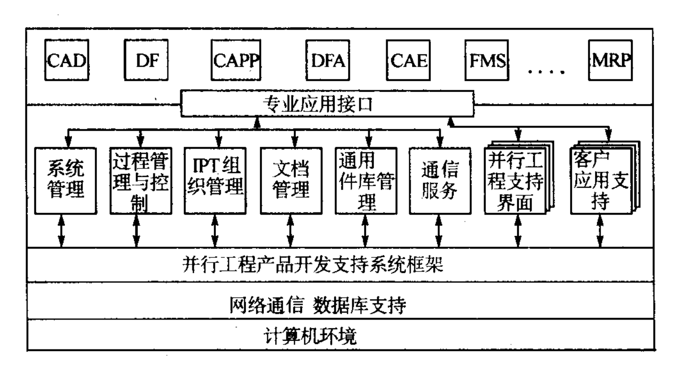


图 9.12-18　并行工程支持系统的总体结构

3.4　并行工程的过程建模

并行工程需要对产品开发进行过程建模。过程建模包括定义过程模型，分解开发活动，建立过程的活动流。

过程模型是产品开发要素在开发过程中的形式化描述，是进行并行工程产品开发过程分析、过程重构、过程仿真和控制的基础。产品、组织、资源、活动是产品开发过程的基本属性。

由产品 P、组织 O、资源 R 和活动流 A 四方面模型共同构成的四维复合过程模型，如图 9.12-19 所示。A 是联系 P、O、R 的核心，P 是 A 的工作对象，O 和 R 分别为 A 的执行提供了人力（开发成员）和物力（资源）。因此，过程模型包括产品模型、组织模型、资源模型和活动流模型。

活动的分解就是按照一定的目标将总体开发过程划分为具体的子活动。随着子活动的完成，产品数据信息将逐渐趋于完整。活动分解的一般方法可概括如下。

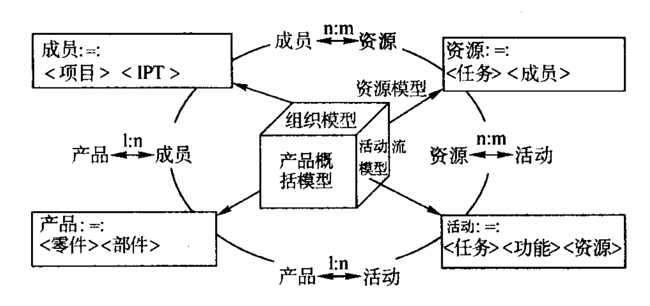
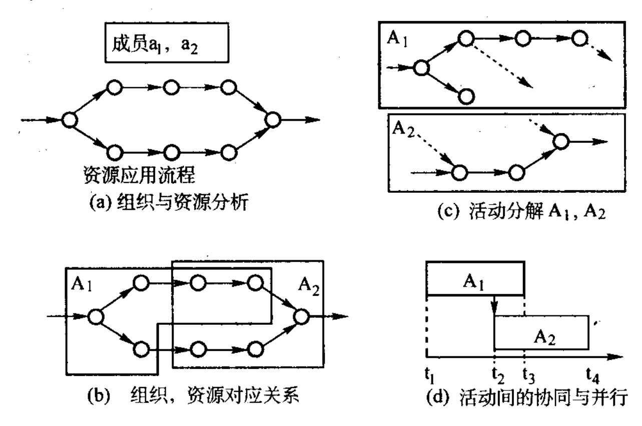


图 9.12-19　并行工程的四维复合过程模型

1）按产品结构分解。这是最常用的活动分解形式。它将产品结构中与功能或目的紧密相关的部分归为一类活动，然后再逐步细分至基本活动。

2）按资源或组织分解。将设计者所使用的资源作为活动分解的依据时，各种资源可以通过组合，成为大小和范畴不同的资源，作用在这些资源上的任务内容则确定了相应的活动。同样，以组织作为活动分解的依据时，最小的组织单元是成员，成员的不同组合构成了不同范畴的组织，活动通过不同组织承担的任务内容而确定。图 9.12-20 说明了在基本组织单元（成员）情况下，根据资源分解的活动（A_1，A_2）。从图中可以看出，活动具有并行性。



(a) 组织与资源分析　(b) 组织，资源对应关系　(c) 活动分解 A_1，A_2　(d) 活动间的协同与并行

图 9.12-20　按资源和组织进行的活动分解

并行工程过程建模采用的方法包括 IDEF0 和 IDEF1X、Petri 网等。

IDEF0 以描述开发过程中的功能模型为主，系统性和层次性强，但不能表达并行和动态的行为。IDEF1X 以建立实体的信息模型为主，能清楚地表达信息在实体间的输入输出关系，但也不能表达活动的并发性。Petri 网以动态的方法描述系统的状态和变迁过程，其数学分析能力强，可描述并发事件，但十分抽象，不能表达活动的所属关系。

布置流图 DFC（Deployment Flow Charting）的过程建模方法中，“布置”主要体现在组织的分解上，它分清了活动的组织所属关系，明确了活动间的执行时序。

产品开发活动之间不但有并行、协同关系，还存在着逻辑关系（与、或、非），在 DFC 方法基础上，提出了应用于并行工程过程建模的图形表达工具——逻辑布置流图 LDFC（Logical Deployment Flow Charting）。它在 DFC 的基础上增加了对活动间的逻辑关系的定义，并对 DFC 的构成元素提供了数据描述结构。LDFC 的建模能力可概括为：

① 可同时表达不同成员的活动；

② 可表达成员间的合作、协同、会议等行为；

③ 支持过程的重组、添加、删除等规划功能；

④ 可反映组织、资源、信息流等。

LDFC 活动间存在着三种逻辑关系，即“与”（&），“或”（O），“异”（X），其逻辑结构如图 9.12-21 所示。图 9.12-21 是一个简化的活动流图，其中方框为一活动，用结合框 J 表示活动间的三种逻辑关系，箭头指向的活动，依赖于箭头引出的活动。

①“与”型关系。图 9.12-21 中 J1 表示活动 a 与其后的



2个活动为“与”关系，当a完成后，要同时开始并全部执行J2和J3所规定的活动。

②“或”型关系。图9.12-21中J3为“或”关系，当活动a（设计规划）执行成功后，可以着手执行活动f和活动g，或只执行其中的一个。

③“异”型关系。图9.12-21中J2为“异”关系，即只能选择执行活动b和c中的一个活动。

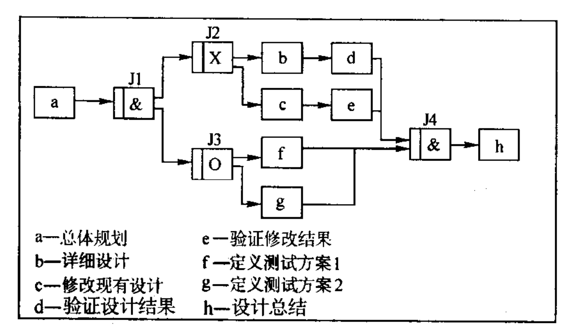


图 9.12-21 活动间的逻辑关系

LDFC的结构如图9.12-22所示，其中纵轴表示组织，它反映不同成员的责任关系，横轴表示产品的开发阶段，如需求分析、概念设计，详细设计等。

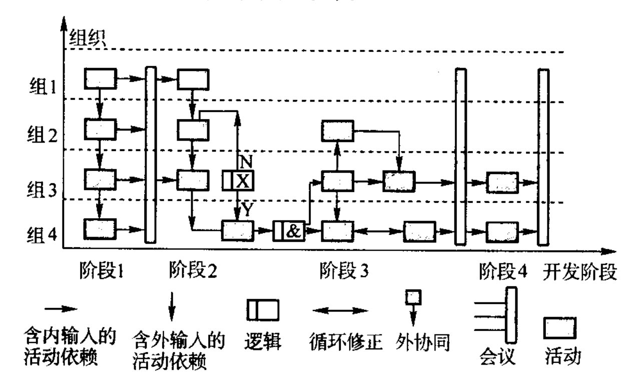


图 9.12-22 LDFC图的结构

3.5 并行开发过程的分析

3.5.1 过程分析方法

通常用于过程分析的主要方法有关键路径法（CPM）、优化程序法（PERT）等。由于这些方法都不能准确地描述活动间的复杂联系，如反复性和依赖性，因此并不完全适合并行工程产品开发的过程分析。

用有向图和相应的关联矩阵进行过程分析，是实施并行工程中采用较多的方法。该方法不但表达了产品过程模型中的活动关系，而且还能借助数学工具进行分析，因而较适合于并行工程的过程分析。

过程分析模型由两部分组成，即有向活动图和关联矩阵。有向活动图是用矢量表示的有向图，矢量的顶点表示过程中的活动，矢量方向表示活动间的依赖关系。如“a→b”，表示活动b依赖于活动a。关联矩阵以矩阵的形式描述过程活动。

有向活动图G为三元组（V，E，Ψ），V表示非空的活动集合，E表示矢量的集合，而Ψ表示映射函数，即每一个连接矢量都连接着一对活动结点（V_i，V_j），从V_i到V_j存在一连接矢量时，表示V_j依赖于V_i。

图9.12-23是由一过程模型的LDFC建立的活动有向图。应用活动有向图建立相应的关联矩阵，就形成了过程分析模型。图9.12-24所示为图9.12-23对应的关联矩阵。

关联矩阵$\boldsymbol{A}$中的行与列均表示有向图中的n个活动，对于矩阵元素a_{ij}有：

$$a_{ij}=\begin{cases}* & \text{活动}\ i\ \text{依赖于活动}\ j\text{，即}\ i,\ j\ \text{之间有矢量连接}\\ 0 & i,\ j\ \text{之间无矢量连接}\end{cases}$$

为了分析方便起见，关联矩阵中省略了零元素，对角线元素用“+”表示。

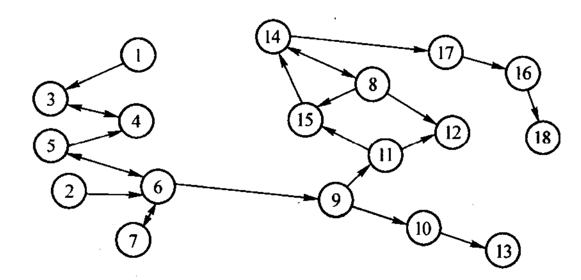


图 9.12-23 活动有向图

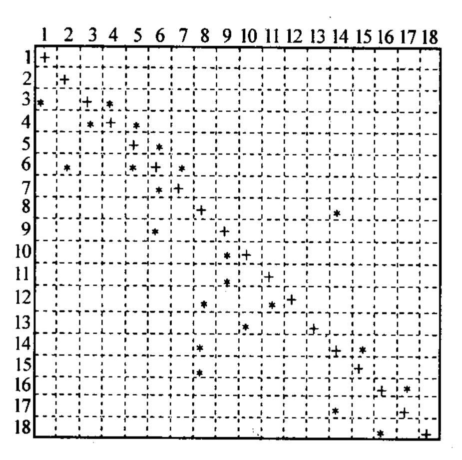


图 9.12-24 关联矩阵

该关联矩阵具有如下性质。

1）矩阵中元素全为零的行对应着有向图的起始结点，元素全为零的列对应着有向图的结束结点。

2）当且仅当结点i存在自环回路时，对角线元素$a_{ii}=1$。

运用所建立的关联矩阵，可以分析产品开发过程的并行度和成功度，研究改进开发过程的策略。

3.5.2 过程并行度的分析

并行度分析的目的是标识和强化活动间的并行关系，为过程改进提供建议。分析方法是，应用关联矩阵的三角剖分算法将活动划分为若干组，组之内的活动具有强关联性，然后对组与组之间的并行度进行分析，找出潜在的可以并行的活动，并提出改进措施。

应用三角剖分算法可将图9.12-24所示的活动关联矩阵划分为图9.12-25所示的分割矩阵形式。变换尽量使矩阵呈下对角分布，或在对角线左右分布，此时将矩阵分割为一系列子矩阵。

在分割矩阵中，活动被分为n个等级L，每个等级L是一些活动的集合：

$$L=\{L1,\ L2,\ \cdots Ln\}$$

其中L1，L2为活动划分中属于同一级活动的集合。

在本例中，

L1＝{1，2}，　L2＝{C（1），C（2）}，　L3＝{9}，
L4＝{10，11}，L5＝{13}，　L6＝{C（3）}，

L7 = {12，17}，L8 = {16}，　　　　　L9 = {18}，
其中，C(1) = {3,4}，C(2) = {5,6,7}，C(3) = {8,15,14}，C(1)、C(2)和 C(3)中有活动分布于矩阵对角线的上方，这表示存在回路现象，即活动之间要通过循环反复完成设计任务，即它们的关系为强关联。

图 9.12-25 中处于对角线活动块之外的活动关联，是活动等级 L*i*（活动组）之间的依赖，称为外依赖。如 1 < 3，2 < 6 等，正是由于外依赖的存在，使活动组不能完全并行地执行。当外依赖处于对角线块下方时，需要先执行此活动。

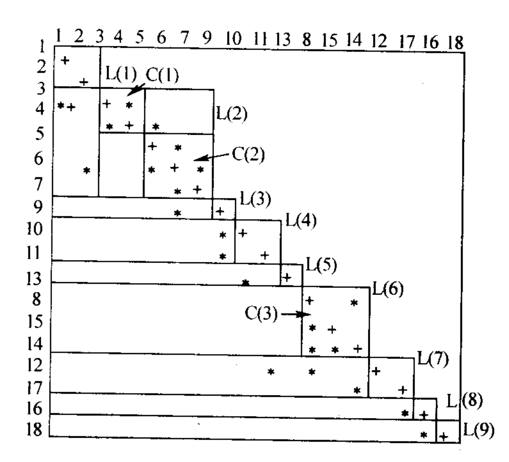


图 9.12-25　分割矩阵

根据上面的分析可知，提高活动组间并行度的方法如下。

1）确定活动组之间的依赖项后，设法移去或重新定义此活动。例如当移去依赖 10 < 13 时，活动 13 可以在活动组 L4 中执行，提高了并行度。

2）对影响并行度的活动进行监控。例如，L1 组中的活动 1 和 2 要在 L2 之前执行，当需要尽早地开展 L2 的活动时，应控制活动 1 和 2 准时完成。

3）确定关键依赖路径。将设计过程表示为图 9.12-26 所示的过程路径，则可以反映出两个活动组之间的依赖活动，前续活动的妥善完成是开展后续活动的条件。最长的活动链构成了开发过程的关键依赖路径，它是影响开发周期的关键因素。该链路上的活动是过程管理的焦点。

L(1)　L(2)　L(3)　L(4)　L(5)　L(6)　L(7)　L(8)　L(9)
1 — C(1)　　9 — 10 — 13　　C(3) — 17 — 16 — 18
2 — C(2)　　11　　12

图 9.12-26　关键依赖路径

并行度 D 反映开发活动的并行性，可以衡量 To – be 模型的改进程度。

并行度 D 的定义有多种，如最大周期定义、平均周期定义、滞后时间定义等。这些并行度的定义均以活动执行时间为基础，由于活动执行时间根据历史经验来估测，具有不确定性，为此提出了无时间因素的并行度定义方法——交互密度定义法。在难以估计活动执行时间的情况下，可采用此方法。并行度的定义方法列举如下。

1）最大周期定义：$D = \max\limits_{1 \le j \le n} \{d_j\}$

其中 d_j 是活动的完成时间。

2）平均周期定义：$\bar{D} = \dfrac{1}{n}\sum\limits_{j=i}^{n} d_j$

3）滞后时间定义法：$D_j^i = 1 - \Delta d_j^i / d_i$

式中，i、j 为两个相邻活动，d_i 为前续活动的执行时间，Δd_j^i 为 i 的后续活动 j 比 i 滞后开始的时间差。

4）交互密度定义法：$D = \dfrac{1}{e\left(n^2 - \sum\limits_{k=1}^{p} R_k^2\right)}$

式中 e 是对角子矩阵之外的元素数目（外依赖数），n 为关联矩阵的行数，R_k 为每活动组中在对角线上的元素数，P 为分割关联矩阵中的活动组数量。根据关联矩阵分割与活动并行执行程度的关系可知，当外依赖数越多时，与活动组的交互密度越大，并行度就越小，表现为分母的左乘因子增大；当活动组划分越细时，活动组并行程度减小，表现为分母的右乘因子增大。

3.6　并行工程的组织管理

3.6.1　IPT 的组建

目前，制造系统的组织管理普遍为递阶方式，产品开发也在递阶管理框架内组织实施。这并不适合大型并行工程项目中成员的组织管理。

并行工程力图使开发者从一开始就考虑产品生命周期内的所有因素，包括质量、成本、服务等。这在组织上必须打破传统产品开发中专业功能部门的界限，建立以成员合作为基础的协同工作组织——集成的多学科开发团队（IPT）。

IPT 是一种权力分散、知识共享的组织机构，它把各环节的成员集合在一起，共同承担产品开发任务。

IPT 中有三类成员，即项目管理决策者、团队领导和团队成员。项目管理决策者提出任务、目标和指导路线，组织产品开发团队。团队成员的行为与整个团队保持一致，团队的数量和学科构成，由产品开发的对象及其复杂程度决定。并行工程的实施不仅是技术应用，更是管理方式和企业文化的变革，项目管理决策者的职责可归纳为四点。

1）协调并行工程组织变革带来的冲击，做出积极的准备和响应。

2）组建 IPT 并充分授权。

3）管理和评价 IPT 的各个方面，提供协同环境的通信，掌握设计进程。

4）定义责任范围，追究发生问题人员的责任，对取得的成就进行奖励。

IPT 根据产品零部件的组成而划分。如图 9.12-27 所示，产品结构可逐级分解为部件、零件。一个零件或组件（如车门）可构成一个设计单元，需要一个 IPT。大型产品的 IPT 可逐级地由若干子 IPT 构成，例如某一车型 IPT 往往需要数十个子 IPT 构成。IPT 之间或 IPT 内开展并行设计。IPT 中的成员来自于与产品生命周期各环节相对应的部门。产品 IPT 是根据产品的组成划分为若干子 IPT，子 IPT 中有组长和成员。每个功能部门有部门代表负责与 IPT 的联系。

IPT 组长根据产品开发过程的规划，组织成员承担角色，筹备完成活动必需的资源。组长的职责包括：召集小组会议，指挥小组的活动，审查工作报告，及时分析决策，处理日常行政事务等。组长将工作计划提交项目管理决策者，并通过协商制定团队协议，使每个成员都清楚工作任务、计划、完成方法。团队协议包括以下内容。

1）目标约定。申明团队的类别与目标。

2）活动描述。对 IPT 的活动进行明确的定义。

3）任务单。用以描述每个成员的工作。

4）交接形式。规定成员应提交的工作成果，如图、数据、报告等。

5）成员册。列出每个成员的个人情况和所代表的功能。

建立基于 IPT 的工作机制，不仅要实现组织结构上的转变，还要从领导策略、态度、价值认识上进行转换。例如，对质量问题予以最大的重视；不断寻求和支持提高产品质量的方法；及时、准确地传递信息；公开、坦诚地交流思想；

成员作到真正意义上的参与，关心组织的目标，明确为此目标而如何工作和协助他人工作等。

图 9.12-27　IPT 的组成结构

3.6.2　IPT 的管理

组织结构的转变，必然引起成员、资源、财务等管理策略的改变。

1）成员管理。IPT 所导致的一个深刻变化是团队成员从 IPT 中接受工作任务，而不是功能部门。但团队成员的实际工作仍需功能部门和 IPT 的配合。IPT 成员的调配须由 IPT 与功能部门达成协议。

当一个成员在多个 IPT 中任职时，必须确认一个主 IPT，便于 IPT 为其规划资源。IPT 组长要对每个成员的工作进行评估，对成员的活动进行管理。

功能部门的代表为 IPT 提供合适的成员人选，并与 IPT 组长紧密配合，考察 IPT 成员的表现，确认奖酬分配、任留通知等事项。

2）任务资金的管理。产品过程模型为 IPT 和功能部门之间分配任务提供了标准。IPT 负责产品开发的主要任务，但不排除通过协商，部分任务由功能部门承担。而任务的多少决定了 IPT 和功能部门的资金分配。

3）资源管理。IPT 成员所需要的各种支持资源，如计算机、交通、培训、设备等，由功能部门代表提供。

4）评估。除了传统的资金、计划、质量等评估方法，IPT 组长还可采用表现描述法[83]，衡量成员是否完成所指定的任务。

5）工作培训。成员培训由 IPT 组长和功能部门代表共同策划，功能部门代表确认 IPT 成员的培训方向，IPT 领导确认成员的培训安排。

3.7　模具制造并行工程

每一个新产品的开发都需要新的模具，随着新产品更新换代速度的加快，模具的需求量日益增长，并对模具的设计制造周期提出了越来越严格的要求。因此，模具行业普遍面临交货期的压力，成为制约其发展的一个瓶颈问题。并行工程的出现为解决模具行业的这个突出矛盾提供了有效途径。近年来，许多研究者在模具并行工程的研究中投入了大量的精力。许多模具企业在结合本企业的实际情况实施并行工程中取得了显著效益。图 9.12-28～图 9.12-31 为提出的在不同模具企业实施并行工程的应用模式。

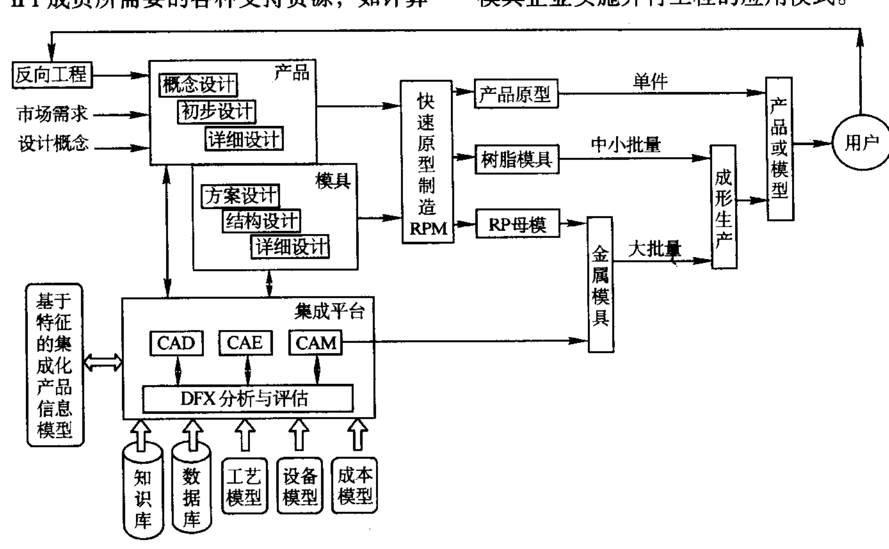


图 9.12-28　快速模具制造并行系统

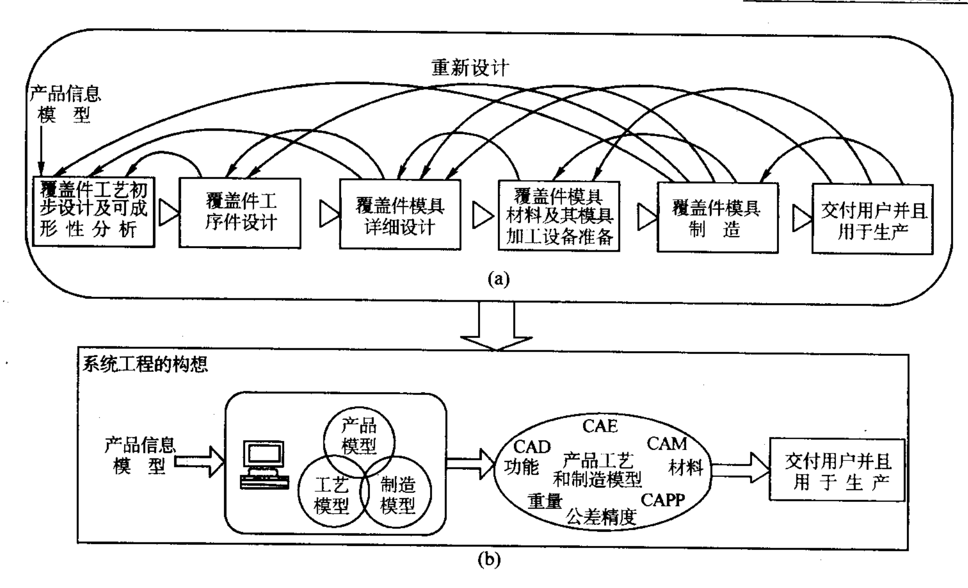


图 9.12-29　覆盖件产品工艺及模具设计并行系统

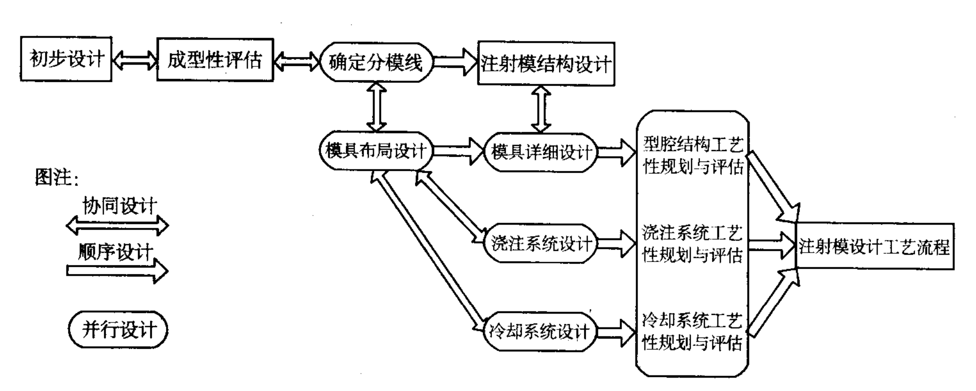


图 9.12-30　注射模成型工艺与模具并行设计系统

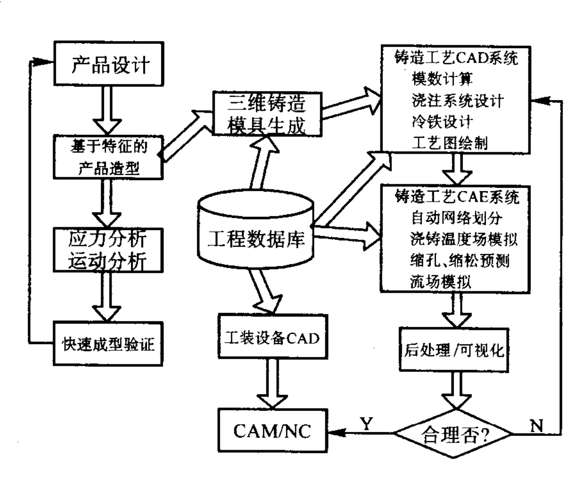


图 9.12-31　铸造模具设计制造并行系统

4　虚拟制造

4.1　虚拟制造的定义

20 世纪 80 年代以来，产生了许多新的制造技术和制造系统，例如柔性制造系统、计算机集成制造系统和并行工程等，大大促进了产品质量和生产效率的提高。随着计算机技术和信息技术的发展，20 世纪 90 年代出现了敏捷制造、分布式制造和虚拟企业等概念和技术，虚拟制造（Virtual Manufacturing，VM）就是在这种情况下产生的。

虚拟制造以信息技术、仿真技术和虚拟现实技术为基础，在产品设计和制造系统的物理实现之前，就可预测未来产品的性能和制造系统的状态，从而可以作出前瞻性的决策与优化实施方案。

目前，对虚拟制造尚无一个统一的定义，人们从不同的角度对虚拟制造进行了不同的描述。例如，有人认为虚拟制

造是仿真、建模和分析技术及工具的综合应用，以增强对设计、制造和生产决策的控制；有的人将虚拟制造描述为增强各级决策与控制的一体化的综合制造环境；也有的人将虚拟制造定义为“在计算机上的制造”，即虚拟制造提供建模与仿真环境，在计算机上仿真设计、加工和装配过程。

综合各种关于虚拟制造的定义，可以对虚拟制造作如下描述：

虚拟制造是利用仿真与虚拟现实技术，在高性能计算机及高速网络的支持下，采用群组协同工作，通过模型来模拟和预估产品功能、性能及可加工性等各方面可能存在的问题，实现产品制造过程，包括产品的设计、工艺规划、加工制造、性能分析、质量检验，并进行过程管理与控制。

虚拟制造涉及到多个学科领域，是对这些领域知识的综合集成与应用。计算机仿真、建模和优化技术是虚拟制造的核心与关键技术。可以认为，虚拟制造是对制造过程中的各个环节，包括产品的设计、加工、装配，乃至企业的生产组织管理与调度进行统一建模，形成一个可运行的虚拟制造环境，以软件技术为支撑，借助于高性能的硬件，在计算机局域/广域网络上，生成数字化产品，实现产品设计、性能分析、工艺决策、制造装配和质量检验。它是数字化形式的制造系统，是对实际制造过程的动态模拟。所谓“虚拟”，是相对于实物产品的实际制造系统而言的，强调的是制造系统运行过程的计算机化和数字化。

4.2 虚拟制造的分类

虚拟制造是一个新的概念，正处于不断发展的过程中。根据虚拟制造研究中出现的不同侧重点，可以将虚拟制造分为不同的类别。

(1) 以设计为中心的虚拟制造（Design-Cented VM）

这类虚拟制造技术是将制造信息加入到产品设计与工艺设计中，并在计算机中进行数字化制造，仿真多种制造方案，检验其可制造性与可装配性，预测产品性能，其主要目的是通过制造仿真来优化产品设计及工艺过程，尽早发现设计中存在的问题。

由于产品设计过程的复杂性，以及设计对制造全过程的重大影响，因此需要设计部门与制造部门之间在计算机网络的支持下协同工作。虚拟设计平台是在 Internet 的支持下工作的，其基本功能及模块包括产品异地设计、产品优化设计和产品性能评价等。异地，可以是同一地区的不同协作单位，亦可以是不同地区和不同国家。通过对产品信息综合分析，对产品实现建模以及产品的优化设计和零件的分析优化。这种综合分析，主要是对产品的性能进行分析，并通过反复迭代，达到产品零部件及产品整体的优化。在此基础上，通过产品性能评价及产品可制造性评价软件模块，对产品的结构、产品制造及产品装配和产品质量、产品制造的经济性等进行全面分析，从而为用户提供全部制造过程所需要的设计信息和制造信息，以及相应的修改功能，并向用户提出产品设计修改建议。整个设计过程是在一种虚拟环境中进行的。由于采用了虚拟现实技术，通过高性能、智能化的仿真环境，可以使用户达到高度的真实化。使用某些数字化仿真的工具，可使操作者与虚拟仿真环境有着全面的感官接触与交融，使操作者有身临其境之感，从而可以直接感受所设计产品的性能、功能并不断加以修正，尽可能使产品在设计阶段就能达到一种真正的性能优化、功能优化和可制造性优化。此外还可通过快速原型系统输出设计的产品原型，进一步对设计进行评估和修改。

(2) 以生产为中心的虚拟制造（Production-Centered VM）

以生产为中心的虚拟制造是将仿真能力加入到生产计划模型中，其目的是方便和快捷地评价多种生产计划，检验新的工艺流程的可信度、产品的生产效率和资源的需求情况，包括设备购置和合作伙伴的需求等，从而优化制造环境的配置和生产的供应计划。

这类虚拟制造技术提供虚拟的制造车间现场环境和设备，使之可以分析改进生产计划和生产工艺，验证 NC 程序及物流控制。

它涉及虚拟制造平台和虚拟生产平台乃至虚拟企业平台，它贯穿于产品制造的全过程，包括与产品有关的工艺、工具、设备、计划以及企业等。通过对产品制造全过程模型进行模拟和仿真，实现制造方案的快速评价以及加工过程和生产过程的优化，进而对新的制造过程模式的优劣进行综合评价。产品制造全过程的模型主要包括虚拟制造环境下产品/过程模型和制造活动模型，这是现实制造系统中的物质流和信息及各种决策活动在虚拟环境下的映射。包括生产组织、工艺规划、加工、装配、性能、制造评估等制造过程信息及相应活动。通过仿真，建立产品制造过程的虚拟设备、虚拟传感器、虚拟单元、虚拟生产线、虚拟车间及虚拟工厂（公司），以及各处虚拟设备的重用、重组和基于动画真实感的虚拟产品的装配仿真、生产过程及生产调度仿真、数控加工过程的仿真等，从而实现产品制造的局部过程最优或全局最优，如产品的开发周期和成本的最小化，产品制造质量的最优化以及生产效率的最高化等。

(3) 以控制为中心的虚拟制造（Control-Centered VM）

这类虚拟制造技术将仿真能力加到控制模型中，提供对实际生产过程的仿真环境。其目的是在考虑车间控制行为的基础上，评估新的产品设计和与车间生产相关的活动，达到优化制造过程和改进制造系统的目标。提供从设计到制造一体化的虚拟环境，允许评价产品的设计、生产计划和控制策略，并提供在模拟过程中改进的手段。

为了实现虚拟制造系统的组织、调度与控制策略的优化以及虚拟制造过程中的人机智能交互与协同，需要对全系统的控制模型及现实加工过程进行仿真，这就是以控制为中心的虚拟制造。它主要利用仿真中的加工控制模型，实现对现实产品生产周期中的优化控制。

一般来说，以设计为中心的虚拟制造过程为设计者提供了产品设计阶段所需的制造信息，从而使设计最优；以生产为中心的虚拟制造过程则主要是在虚拟环境下模拟现实制造环境的一切活动及产品的全过程，对产品制造及制造系统的行为进行预测和评价，从而实现产品制造过程的最优；而以控制为中心的虚拟制造过程则更偏重于现实制造系统的状态、行为、控制模式和人机界面，通过全局最优决策的理论和技术，突破企业的有形界限和延伸制造企业的功能，根据最优原理，以及环境和目标的变化进行优化组合，动态地调整组织机构，创建地域上相距万里的虚拟企业集团，以全局优化和控制为目标，对不同地域的产品设计、产品开发、市场营销、加工制造、装配调试等，通过计算机网络加以连接和控制。

4.3 虚拟现实及其实现

虚拟现实利用计算机生成一种模拟环境，通过多种传感设备使用户置身于该环境中，实现用户与该环境直接进行自然交互的技术。这里所谓的模拟环境就是利用计算机生成的具有表面色彩的立体图形，它可以是某一特定现实世界的真实体现，也可以是纯粹构想的世界。传感设备包括立体头盔（Head Mounted Display）、数据手套（Data Glove）、数据衣（Data Suit）等穿戴于用户身上的装置和设置于现实环境中的传感装置。自然交互是指用日常使用的方式对环境内的物体进行操作，如用手拿东西、行走等，并得到实时反馈。

虚拟现实（Virtual Reality）技术是应改善人与计算机的



交互方式，提高计算机可操作性的需求而产生的。它综合利用计算机图形系统、各种显示和控制接口设备，在计算机上生成的可交互的三维环境（亦称虚拟环境）。由图形系统及各种接口设备组成的，用来产生虚拟环境，并提供交互性操作的计算机系统称为虚拟现实系统。

虚拟现实系统包括操作者、机器和人机接口三个基本要素。其中，机器是指用来生成能与之交互的虚拟环境的计算机。人机接口是将虚拟环境与操作者连接起来的传感与控制装置，如头盔、数据手套和数据衣等。虚拟现实可提供实时交互性操作、三维视觉空间和多通道的人机界面，如视觉、听觉、触觉等。

利用虚拟现实系统可以动态地模拟现实世界，计算机可依照用户的交互输入，及时地修改虚拟环境。在虚拟环境中，用户有身临其境的沉浸感，有利于充分发挥其创造力。虚拟现实系统必须具备与用户交互、实时响应交互的影像、用户拥有自主性这三个特点。

虚拟现实系统的结构如图 9.12-32 所示，其组成包括输入模块、传感器模块、响应模块和反馈模块等。

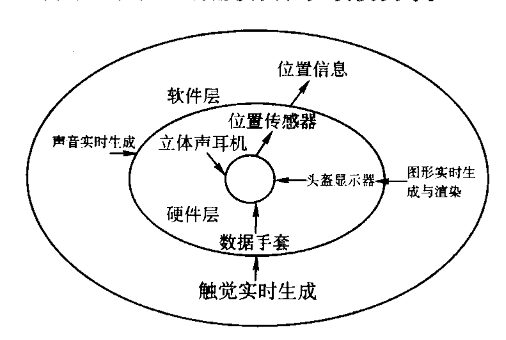


图 9.12-32　虚拟现实系统的结构

输入模块：是虚拟现实系统的输入接口，其功能是检测用户的输入信号，并通过传感器模块作用于虚拟环境。输入模块一般是数据手套、头盔显示器上的传感器，用于感应手的动作、手和头部的位置；对于桌面虚拟现实系统而言，输入模块一般是指键盘、鼠标、麦克风等。

传感器模块：是虚拟现实系统中操作者和虚拟环境之间的桥梁。一方面，传感器模块接受输入模块产生的信息，并将其作用于虚拟环境；另一方面将操作后产生的结果反馈给输出模块。

响应模块：是虚拟现实系统的控制中心。响应模块一般是软件模块，其作用是处理来自传感器模块的信息，如根据用户视点位置和角度实时生成三维模型，根据用户头部的位置实时生成声效。

反馈模块：是虚拟现实系统的输出接口。其功能是将响应模块生成的信息通过传感器模块传给输出设备如头盔显示器、耳机等，实时渲染视觉效果和声音效果。

虚拟现实的实现方法大体可分为两种，即基于图像的方法和基于模型的方法。

基于图像的虚拟现实的实现方法，应用图像无缝连接技术和纹理映射技术，在用户的观察点所处的空间重建三维场景，生成全景图。生成全景图所用的原始资料是利用照相机平移或旋转得到的部分重叠的序列图像样本。

全景图实际上是空间中一个视点对周围环境的 360°的全封闭视图。根据全景图允许浏览的空间自由度，全景图可分为柱面全景图和球面全景图，柱面全景图允许用户对场景进行水平空间 360°环绕浏览，球面全景图允许用户对场景进行经纬 360°全方位的环绕浏览。

基于模型的虚拟现实的实现方法是以几何实体建立虚拟环境。利用计算机图形学技术产生几何实体，并进行实时渲染，建立虚拟现实的模型，通过加入事件响应，实现移动、旋转、视点变换等操作，从而实现交互式的虚拟环境。

根据对虚拟环境的不同要求和对于使用目的或者应用对象的不同要求，虚拟现实系统可分为三类：沉浸式、非沉浸式和叠加式。

沉浸式系统又称为佩戴型系统，是用封闭的视景和音响系统将用户的视听觉与外界隔离，使用户完全置于计算机生成的环境之中，计算机通过用户戴的数据手套和跟踪器可以测试用户的运动和姿态，并将测得的数据反馈到生成的视景中，产生人在其中的效果。有时，沉浸式系统还提供触觉功能。佩戴型系统具有使参与者身临其境的沉浸感，但投资成本太高。

非沉浸式系统又称为桌面虚拟现实系统或非佩戴型系统，其视景是通过计算机屏幕、或投影屏幕、或室内的实际景物加上部分计算机生成的环境来提供给用户的。音响是由安放在桌面上的或室内音响系统提供的。汽车模拟器、飞机模拟器、电子会议等都属于非沉浸式系统。非沉浸式系统的优点是用户比较自由，不需要戴头盔和耳机，不需要戴数据手套和跟踪器，可以同时允许多个用户进入系统，对用户数的限制小，投资成本低。但非沉浸式系统不容易解决双目视觉竞争问题，较难构成用户沉浸于其中的环境。

叠加式虚拟现实系统允许用户对现实世界进行观察的同时，虚拟图像叠加在被观察点，即现实世界之上。叠加式虚拟现实系统又称为“补充现实系统”或者“扩大的现实系统”。例如，战斗机驾驶员使用的头盔可让驾驶员同时看到外面世界及上述的合成图形。额外的图形可在驾驶员对机外地形视图上叠加地形数据，或许是高亮度的目标、边界或战略地标。显然，补充现实系统的效果在很大程度上依赖于对使用者及视线方向的精确的三维跟踪。

4.4　虚拟制造的体系结构

虚拟制造系统是按一定的体系结构组成和运行的。根据目前的研究成果，可将虚拟制造系统分为两类，即通用体系结构和专用体系结构。

（1）通用体系结构

这类体系提出时并非是针对 VM 设计的，代表性的有 PERA、CIM—OSA、GERAM：①PERA 体系是在分析企业任务（信息任务、制造任务、基于人的任务）的基础上提出的，通过两个视图（功能视图和实施视图）、两个流（信息流和制造流）来构造。②CIM—OSA 体系是由一个 3×3×4 的三维积木方块构成，其 3 个轴定义了 3 个基本过程，即具体化过程，按通用、部分通用、专用这 3 个层次来支持获得企业需求；推导过程，按需求定义、设计说明、实施描述这 3 个层次来整理已获得的需求；生成过程，按功能视图、信息视图、资源视图、组织视图来分析支持企业特定视图。③GERAM 体系从分析实体（如企业产品）的生命周期出发，试图通过通用的建模过程，以链式环节的形式来建立特定企业的体系结构。

上述 3 个体系基本思想都是为了描述企业对象中的各实体及各活动间的集成，以提供企业或制造系统建模的方法，但它们之间也有区别：PERA 支持企业或部门的实施和操作，其流程涉及到实体定义、任务定义、管理方法、操作过程等；CIM—OSA 主要注重于操作支持，尤其是模型驱动之操作评价的决策支持系统；GERAM 着重定义与企业相关的通用概念，如生命周期、实体类型、企业建模和面向不同用户的建模语言等。

（2）专用体系结构

这类体系是针对 VM 设计的，从某一个或几个方面出

发，解决了 VM 体系中的一些关键问题。代表性的有 Mediator 体系、Iwata 体系、分布式体系和工具集体系。

1）Mediator 体系。该体系通过建立一个开放式的信息和知识体系，来提供一套支持复杂制造环境的柔性管理技术。由于系统的地域分布性及其不同的应用软件、多类型的操作平台、协议和用户界面，Mediator 体系着重处理上述前提下的知识支持技术，以更快地进行通讯。该体系结构图由 4 个扇面（用户、设计应用、体系内核、通用软件包）和 4 个轮圈（界面层、应用层、活动层、通信层）构成，体系的轴心是一个支持合作、分布式的用户环境。该体系是一个侧重于知识信息（数据）的管理体系，它考虑多软件、多地域的集成方法，但未涉及到产品开发周期，且未体现模型技术和数据管理技术的地位。

2）Iwata 体系。Iwata 等认为现实制造系统由真实物理系统（RPS）和真实信息系统（RIS）组成，而虚拟制造系统由虚拟物理系统（VPS）和虚拟信息系统（VIS）组成，故 VM 的体系应具有应用独立性，VPS、VIS 与 RIS 的相互独立，使得 VPS 可应用于不同的 VIS 或 RIS。虚拟制造系统的结构应与其所映射的真实制造系统相似。该体系较全面地分析了一个企业或车间内的制造活动和数据/模型，其集成性强，但忽略了 VM 的活动/数据/控制行为的分布性。

3）分布式体系。该体系认为用户使用计算机中界面的目的是为了获取信息或执行某项活动，其操作“对象”是“服务”，“服务”又与激发它的实体（通常为用户客体）进行通信。“服务”的实施可以是一个进程或多个分布（或不分布）的进程。该体系注重于活动/数据的网络分布性研究，并提出了解决思路，初步解决了 VM 的分布性要求，但缺乏对 VM 下的项目管理、设计和制造等事务的支持。

4）工具集体系　该体系认为企业（系统）建模有 5 个领域：活动、组织、方法、业务、时间，体系支持不同的雇员工作，其基本框架包括浏览器、任务选择管理、模型管理、中继器。该体系从通用性考虑，认为可以用工具表达产品开发过程的各类活动，其缺陷在于不支持产品开发活动中产品和制造数据间的反馈和交互。

（3）虚拟制造的总体框架

通过上述分析可知，理想的 VM 体系结构，不仅应把虚拟产品开发过程中的设计、制造及装配、生产调度、质量管理等环节有机地集成起来，实现产品开发全过程的信息、功能和过程集成，实施产品开发活动的并行运作，还要充分体现人在生产活动中的能动性，达到人、组织、管理、技术的协同工作，同时也要支持生产经营活动和生产资源的分布式特性，它应能提供一个开放性强的框架结构。该体系结构应具有层次化的控制方法和“即插即用”的开放式结构，同时支持异地分布的制造环境下的产品开发活动的并行开展。图 9.12-33 为这种体系框架的结构，它提供了虚拟设计、虚拟加工、虚拟生产和虚拟企业的平台。

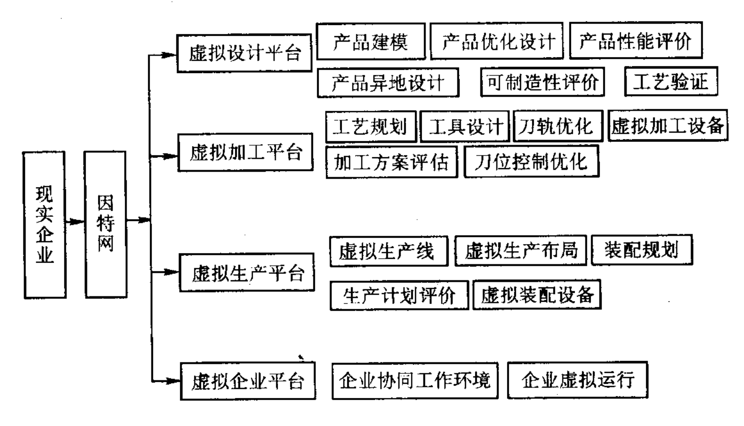


图 9.12-33　虚拟制造的总体框架

4.5　虚拟制造中的关键技术

虚拟制造涉及的技术领域极其广泛，根据各种相关技术在虚拟制造中的地位，可以把这些技术划分为 4 级：核心技术级（core technology）、使能技术级（enabling technology）、突破技术级（show stopper technology）和一般技术级（common technology）。

核心技术是对于实现 VM 基础而必需的关键的技术，包括：过程特征的虚拟制造方法学；装配仿真技术；产品和工艺的说明性表达；虚拟制造 Meta 模型的自然语言；费用数据库及集成；VM 用户界面（VM 知识系统与用户的通信）；VM 校验与致效方法、算法和工具；工艺模型与仿真；使用 VM 系统的方法学；VM 框架（指南，集成标准等）；设计抽象的方法学；与概念设计及可能的制造方法有关的工具，以及与基于制造特征的工艺及费用估计有关的工具；制造工程自动化（基于知识的计算机应用到完成制造工程决策）；仿真体系结构。

使能技术是指那些对于建立 VM 所必需的技术，包括：制造过程的计算机特征化；广义工艺规则；基于物理学工艺建模；多层次产品定义建模；基于三维表面的造型；模型部件互换；将动态的、分布的和合作的模型集成的能力；模型校验工具；显示技术；协同设计的冲突解决；将制造各阶段的信息集成和关联起来的 STEP 技术；工作流工具；决策效果的自动评价的决策支持工具；面向对象的、动态的、函数化语言和基于事件建模。

突破性技术是指那些 VM 不可或缺的技术，即如果没有这些技术，VM 系统就不可能建立。突破性技术包括：制造过程的计算机特征化；体素，子模型，顾客的数据交换及联接；安全性、密码技术；显示技术。

一般技术是对于 VM 是重要的，并广泛使用的技术，包括：知识表示方法学、协议、语法；面向对象的、动态的、功能语言和基于事件的建模；大型集成数据库结构；面向对象的数据库；机器智能；基于知识的系统，基于规则的系统；人工智能；神经网络；模糊理论；可重构性和模块化的软件；混沌理论；自治代理；计算机硬件性能，高性能计算；联网/通讯。

VM 中的关键技术可以分为两大方面，一方面是虚拟现实技术和相关的计算机技术，另一方面则是与制造应用相关的技术。

与虚拟现实相关的关键技术包括人机接口技术、软件技

术和虚拟现实计算平台。虚拟现实系统的人机接口使操作者可沉浸于虚拟环境中，目前，人们投入较大力量进行研究的主要是视觉、听觉、触觉和位置跟踪等接口。软件技术是创建高度交互的、实时的、逼真的虚拟环境所必需的关键技术，其中虚拟环境的建模、虚拟环境的可交互性和可漫游性是主要考虑的问题。所谓漫游功能，指的是操作者在虚拟环境中运动时，相应的场景应随之改变。虚拟现实计算平台是综合处理各种输入信息，并产生作用于用户的交互性输出结果的计算机系统。虚拟现实系统的实时性对计算平台提出了很高的要求，目前主要是采用高度并行的计算结构和分布式的系统来提高计算性能。

与虚拟制造应用相关的关键技术包括建模技术、仿真技术和可制造性评价等。

虚拟制造系统的应用模型包括生产系统模型、产品模型和工艺模型。生产系统模型可以描述生产系统的能力与特性，可以描述生产系统的状态与动态行为。对生产系统的这种静态和动态的描述，有助于需求和能力的比较，并可预测产品生产的全过程。产品模型除了应包括产品的几何与拓扑、形状特征等静态信息外，还应包括支持 VM 全部活动的信息，以支持 VM 全过程的集成。工艺模型是联系产品模型和生产系统模型的纽带，没有工艺模型的支持，就难实现对产品方案和生产系统性能的评价。虚拟制造中的工艺模型仍需大力研究。

仿真技术是虚拟制造系统的重要支撑技术。VM 系统中的仿真包括设计仿真和制造过程仿真。前者包括产品建模仿真、设计过程仿真等，可支持虚拟设计和协同设计过程。后者包括制造系统仿真和加工过程仿真。制造系统仿真主要是模拟生产计划、调度和工艺路线执行的过程，通过分析评价获得最佳的生产计划与调度控制方案。加工制造过程仿真指的是具体加工过程的仿真，包括切削加工过程仿真、冲压成形过程仿真、塑料成型过程仿真、体积成形过程仿真、铸造成型过程仿真、焊接过程仿真、检测过程仿真和装配过程仿真等。加工制造过程仿真对于评价产品的可制造性至关重要。可制造性评价可以在仿真的基础上，根据评价规则或判据进行，或是通过比较多个方案的仿真分析结果做出。

4.6 虚拟制造的应用

(1) 在汽车产品开发的应用

近年来，虚拟现实技术在汽车制造业得到了广泛的应用。例如，美国通用汽车公司利用虚拟现实系统 CAVE (Computer-Assisted Virtual Environment) 来体验置身于汽车之中的感受，其目标是减少或消除实体模型，缩短开发周期。目前，通用公司的 CAVE 已成为一个用来解决困难设计问题的工具。CAVE 系统同样可用来进行车型设计，可以从不同的位置观看车内的景象，以确定仪器仪表的视线和外部视线的满意性和安全性。1997 年 5 月福特公司宣布，它已成为第一个着眼于“地球村”概念的采用计算机虚拟设计装配工艺的汽车厂商。使用“虚拟工厂”已经使得福特公司的产品开发时间节约，成本降低，并使设计的汽车更适合组装和维修，具有很高的质量。福特公司使用“虚拟工厂”的战略目标是减少生产中采用的 90% 的实体模型，这一目标的实现将为福特公司每年节省 2 亿美元。据估计，使用“虚拟工厂”将在推出一辆新车的过程中减少 20% 的因生产原因修改最初设计的事件。同时，福特公司正在尝试全新概念的发动机“虚拟样机”设计。英国航空实验室采用一个高分辨率头盔显示器、一个数据手套、一个三维系统音响和一台工作站为用户提供了一个由计算机生成的虚拟轿车内部空间，设计人员能够精确研究轿车内部的人体工程学参数，并且在需要时可以修改虚拟部件的位置，进而可以在仿真系统中重新设计整个轿车内部。雷诺汽车公司采用了在“现实生活”的背景下加入“虚拟汽车”的方法来评估待开发的新车型，因此不必制造物理原型就能够检测将要推向市场的汽车，检验造型与环境的匹配及适应性，这对减少汽车新车型开发周期无疑将起积极作用。

(2) 在设计制造和销售业务中的应用

波音 777 飞机有 300 万个零件，这些零件的设计以及飞机的整体设计是在一个由数百台工作站组成的虚拟环境中完成的。当设计师戴上头盔显示器后，就能穿行于这个虚拟的飞机中，审视其各项设计。过去为设计一架新型飞机，必须先建造两个实体模型，每个造价 60 万美元，应用 VM 技术后，不只是节省了经费，也缩短了研制周期，使最终的实际飞机与原方案相比，偏差小于 0.1%，且实现了机翼和机身结合的一次成功，缩短了数千小时设计工作量。

John Deere 公司运用 VM 技术进行焊接生产系统的安装。此项目是用一个虚拟的 3D 环境进行机器人生产系统的设计、评价、测试。另外，EDS 公司还应用 DENEB 软件为通用汽车公司的中、高档豪华汽车分厂进行装配生产优化设计，包括对人员的行走路径、加工设备的摆放优化等。GM 公司因此节省了数百万美元，大大提前了上市时间。

Mercedes-Benz 公司在 1997 年展示了其 VRF 系统。利用该系统，顾客可按照自己的需求，在虚拟环境中对经过充分美术加工的 Mercedes A 级汽车的三维模型进行改造并亲身体验其中感受。消费者可以利用触摸屏选择诸如喷漆颜色、车内装饰风格、镶边种类等许多可选部件。例如，对座椅的位置和结构，消费者就有 72 种选择。然后，可对整个汽车模型进行渲染，生成十分逼真的三维模型。消费者还可以进一步控制一个可以自由移动的 50.8 cm (20 in) 的 LCD 显示器，查看汽车模型的内部细节。通过推、拉、旋转等操作，消费者不仅可以从外部查看汽车的外形，还可以“进入”汽车内部，在不同的座位上环顾四周。

(3) 在敏捷制造和并行工程中的应用

VM 的应用前景十分广泛，它以数字化制造的形式，可应用于许多工业部门，也可以支持其他先进生产模式和产品开发方式。

敏捷制造 (Agile Manufacturing，AM) 是一种小规模、模块化和快速应变的生产方式。在这种生产方式下，一个公司不追求全能，而追求有特色的局部优势。当市场上新的机遇出现时，组织几个有关的公司合作，各自贡献特长，以最快的速度、最优的组合赢得这一机遇。项目完成之后又各自独立经营，这种形式的公司称为虚拟公司。虚拟公司在正式运行之前必须分析这种组合是否最优，是否能协调运行工作，评价这种组合投产后的效益及风险，为了实现这种分析和有效评估，就必须把虚拟公司映射为 VM 系统，然后通过 VM 系统进行仿真分析。所以 VM 技术既是 AM 中的一个关键技术，又是实现 AM 的重要手段。

并行工程是对产品设计和制造、支持过程的集成化、并行化。产品开发人员在产品设计的开始就考虑产品整个生命周期中从概念形成到产品报废的所有因素，包括质量、成本、进度计划和用户要求。为了实现不同部门人员的协同工作，达到并行的目的，必须建立高度集成的开发模型，在许多部分应用仿真技术。因此，VM 技术可为实现并行工程的实时化、可视化提供更先进更有效的技术支持。

编写：李志刚（华中科技大学）



参考文献

1 任仲贵等. CAD/CAM 原理. 北京: 清华大学出版社, 1991

2 孙家广等. 计算机辅助设计技术基础. 北京: 清华大学出版社, 1990

3 孙家广等. 计算机辅助几何造型技术. 北京: 清华大学出版社, 1990

4 李志刚等. 模具 CAD/CAM. 北京: 机械工业出版社, 1994

5 李志刚等. 模具计算机辅助设计. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990

6 夏巨谌、李志刚等. 中国模具设计大典. 南昌: 江西科学技术出版社, 2003

7 童秉枢. 现代 CAD 技术. 北京: 清华大学出版社, 2000

8 宗志坚等. CAD/CAM 技术. 北京: 机械工业出版社, 2000

9 宁汝新等. CAD/CAM 技术. 北京: 机械工业出版社, 1999

10 唐荣锡等. CAD/CAM 技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994

11 孙家广. 计算机辅助设计技术基础. 北京: 清华大学出版社, 2000

12 范玉顺等. 复杂系统的面向对象建模、分析与设计. 北京: 清华大学出版社, 2000

13 童秉枢等. 产品数据管理 (PDM) 技术. 北京: 清华大学出版社, 2000

14 张佑生等. 塑料模具计算机辅助设计. 北京: 机械工业出版社, 1999

15 王国中等. 注塑模具 CAD/CAE/CAM 技术. 北京: 北京理工大学出版社, 1998

16 肖祥芷等编. 冲压工艺与模具计算机辅助设计. 北京: 国防工业出版社, 1996

17 肖景容等编. 模具计算机辅助设计与制造. 北京: 国防工业出版社, 1990

18 肖祥芷等编. CAD 在模具设计中的应用. 北京: 科学出版社, 1993

19 李德群等. 塑料成型工艺及模具设计. 北京: 机械工业出版社, 1994

20 赵汝嘉主编. CAD 基础理论及其应用. 西安: 西安交通大学出版社, 1995

21 陈禹六等. IDEFO 及 IDEF1X 复杂系统通用的设计分析方法. 北京: 电子工业出版社, 1991

22 陈立周. 机械优化设计方法. 北京: 冶金工业出版社, 2003

23 万小利、高志. 计算机辅助机械设计. 北京: 机械工业出版社, 2003

24 Zhao, G.Q., Wright, E.and Grandhi, R.V., Preform Die Shape Design in Metal Forming Using an Optimization Method, Int.J.Numer.Methods Eng., 1997, Vol.40: P.1213 ~ 1230

25 Zhao, G.Q., Wright, E.and Grandhi, R.V., Preform Sensitivity Analysis Based Preform Die Shape Design for Net - Shape Forging, Int.Mach.Tools Manufact., 1997, Vol.37, No.9: P.1251 ~ 1271

26 Zhao, G.Q., Huff, R., Hutter, A.and Grandhi, R.V., Sensitivity Analysis Based Preform Die Shape Design Using the Finite Element Method, J.Mater.Eng.Perform., 1997, No.6: P.303 ~ 310

27 Zhao, G.Q., Wright, E.and Grandhi, R.V., Sensitivity Analysis and Preform Die Shape Design in Metal Forming, Proceeding of the 1996 ASME International Mechanical Engineering Congress, Atlanta, Georgias, USA, 1996: P.123 ~ 124

28 Wright, E., Zhao, G.Q., and Grandhi, R.V., Control of Deformation in Forging through Preform Shape Design, Proceeding of the 1996 ASME International Mechanical Engineering Congress, Atlanta, Georgias, USA, 1996: P.125 ~ 126

29 M.Mantyla.A Modeling System for Topdown Design of Assembled Product.IBMJ.Res.Develop, 1990, 9 (5): 200 ~ 213

30 Rajneet Sodhi, Joshua U.Turner.Towards Modeling of Assemblies for Product Design.Computer-Aided Design, 1994, 26 (2): 128 ~ 228

31 S.H.Mullins, D.C.Anderson.Automatic Identification of Geometric Constraints in Mechanical Assemblies.Computer-Aided Design, 1998, 30 (9): 715 ~ 726

32 朱赛娟等. PDM 中数据的安全性与可靠性的研究. 制造业自动化, 2000, 22 (4): 35 ~ 36

33 李建明等. 产品数据管理技术发展与展望. 计算机集成制造系统, 1998, 4 (6): 1 ~ 6

34 邢竞帆. 产品数据管理系统 (PDM) 在并行工程中的应用. 计算机应用, 2000, 20 (2): 53 ~ 54

35 李原等. 基于 PDM 的 CAx 集成技术研究. 制造业自动化, 2000, 22 (1): 23 ~ 26

36 彭继忠等. 基于 PDM 框架的应用集成研究与实践. 计算机集成制造系统, 2000, 6 (2): 65 ~ 67

37 杨进等. 一个部门级 PDM 系统的整体框架及实施方案. 机械科学与技术, 1999, 18 (4): 685 ~ 688

38 李建明等. PDM 技术在并行工程中的应用与实施. 中国机械工程, 1998, 9 (1): 24 ~ 27

39 李建明等. 面向 CIMS 的 CAx 信息管理与集成的研究. 清华大学学报, 1998, 38 (10): 65 ~ 69

40 米智伟等. 敏捷化 PDM 集成框架的研究. 中国机械工程, 1999, 10 (11): 1220 ~ 1222

41 褚兴军等. 面向对象的产品数据管理框架和数据组织. 计算机辅助设计与图形学学报, 1999, 11 (6): 567 ~ 571

42 Kempfer L.Redefining Product Data Management.Computer-Aided Engineering, 1997, 18 (2): 52 ~ 56

43 Lee D L, Chen Yuh-Min.Integrated Product and Process Data Management.Integrated Computer-Aided Engineering, 1996, 3 (1): 1 ~ 4

44 Miller E.PDM Forum.Computer-Aided Engineering, 1996, 15 (6): 32 ~ 36

45 何汉武等. 基于数据库的模具装配树建模及 BOM 自动生成. 计算机工程与应用, 1997, (7): 119 ~ 121

46 史翔. 模具 CAD/CAM 技术及应用. 北京: 机械工业出版社, 1998

47 林洁. 数控加工程序编制. 北京: 航空工业出版社, 1993

48 刘雄伟等. 数控加工理论与编程技术. 北京: 机械工业



出版社，1994
49 于华．数控机床的编程及实例．北京：机械工业出版社，1996
50 杨岳等．CAM 技术与应用．北京：机械工业出版社，1996
51 胡石玉．模具制造技术．南京：东南大学出版社，1997
52 李斌．数控加工技术．北京：高等教育出版社，2001
53 林好转．平行线分割一步平移法排样算法的研究．锻压技术，1994，19（5）：33～38
54 孙友松等．优化排样的顶点算法．锻压技术，1995，20（4）：23～25
55 王华昌等．冲裁件优化排样算法的研究．中国机械工程，2001，12（2）：199～202
56 李建军等．基于特征的智能化级进模条料排样．塑性工程学报，1997，4（1）：26～30
57 Michel R. Duffey，Qian Sun. Knowledgebased Design of Progressive Stamping Dies. Journal of Materials Processing Technology，1991，（28）：221～227
58 J.J.Shah. Assessment of Feature Technology. Computer Aided Design，1991，23（5）：331～343
59 姚华等．知识的层次模型在冲模设计中的应用．机械科学与技术，1999，18（1）：145～147
60 何汉武等．基于装配的全柔性化模具 CAD 技术研究．计算机辅助设计与图形学学报，1999，11（5）：446～449
61 李东波等．面向并行设计的模具装配模型描述．机械科学与技术，1999，18（1）：36～37
62 唐敦兵等．模具产品集成建模研究．计算机集成制造系统，1999，5（5）：42～46
63 胡小平等．基于产品信息模型的智能级进模 CAD/CAM 系统．中国机械工程，1996，7（5）：11～13
64 王耕耘等．支持自顶向下模具设计的装配建模方法．中国机械工程，1998，9（1）：46～48
65 王洪俊等．汽车覆盖件模具 CAD 技术的现状与发展．汽车工艺与材料，1999，（1）：36～39
66 林巨广等．汽车覆盖件模具 CAD/CAM 一体化技术的研究．模具技术，1999，（6）：7～11
67 王耕耘等．CIMS 环境下汽车覆盖件模具 CAD/CAM 系统研究．计算机集成制造系统，1996，2（4）：27～31
68 王耕耘等．覆盖件模具 CAD 系统的研究．锻压技术，1997，22（4）：52～56
69 王义林等．基于特征的汽车覆盖件冲压 CAPP 系统研究．计算机集成制造系统，1996，2（4）：32～37
70 李德群等．注射模软件的三个发展阶段．模具工业，1998，（6）：3～6
71 张宜生等．注射模 CAD/CAE/CAM 系统的实用化与集成化．模具工业，1997，（1）：6～8
72 张佑生，田卫东．塑模零件建模技术及实现．计算机与信息技术，1998，（3）：7～12
73 张宜生等．塑料注射成型模具变量装配技术．中国塑料，2000，14（2）：86～90
74 李海龙等．基于约束的装配体技术．计算机辅助设计与图形学学报，1997，9（3）：249～255
75 董立武．基于装配模型的注塑模 CAD/CAM 系统的研究：[学位论文]．武汉：华中理工大学材料学院，1998
76 周华民等．塑料成型缺陷诊断专家系统．塑料科技，1997，（4）：30～32
77 周华民等．实用化塑料注射模 CAD 系统．中国塑料，1999，13（1）：75～79
78 卢立新等．闭式锻模 CAD/CAM 系统．模具工业，1999，（10）：3～6
79 周卫国等．长轴类锻件锻模 CAD 系统．锻压技术，1996，21（3）：49～54
80 周杰等．长轴类锻件横截面积的自动计算．锻压机械，1995，30（1）：25～27
81 尹建伟等．基于特征造型的轴类零件的自动参数化绘图方法．计算机辅助设计与图形学学报，2000，12（3）：220～225
82 万月亮等．摇臂类锻件锻模 CAD 系统．模具工业，1999，（10）：6～11
83 卢立新等．轴对称变形类锻件闭式锻模 CAD 系统的研制．锻压技术，1999，24（5）：54～56
84 夏巨谌等．闭式模锻．北京：机械工业出版社，1993
85 赵国群，王广春，贾玉玺，赵振铎．材料塑性成形过程最优化设计-I 有限元灵敏度分析方法．塑性工程学报，1999，Vol.6，No.2：P.1～7
86 赵国群，王广春，赵振铎，贾玉玺．材料塑性成形过程最优化设计-Ⅱ灵敏度分析方法在模具设计中的应用．塑性工程学报，1999，Vol.6，No.3：P.1～6
87 赵国群，马新武，王广春，赵新海．锻造过程最优化预成形设计系统的开发研究．锻压机械，1999，Vol.34，No.4：P.13～16
88 李发致．模具先进制造技术．北京：机械工业出版社，2003
89 来可伟、殷国富．并行设计．北京：机械工业出版社，2003
90 潘雪增．并行工程原理及应用．北京：清华大学出版社，1997
91 李键等．基于对象技术的协同设计研究．计算机工程与应用，2000（4）：1～4
92 Jian Dong. Organization Structures. Concurrent Engineering and Computer Enterprise Integration. Concurrent Engineering：Research and Application，1995，10（4）：2～50.
93 K.J.Cleetus. Definition of Concurrent Engineering. CERC Technical Report Series. Research Notes，CERC-TR-RN-92-003.
94 L.W.Eills. Practice in Concurrent Engineering. Proceedings of International Management Conference，1992.10：15～118.
95 J.R.Hartly. Concurrent Engineering：Shorting Lead Time，Raising Quality and Lowering Costs. Cambridge：MA Productivity Press，1992.
96 陈泓等．客户/服务器模型在模具设计中的应用．计算机辅助设计与图形学学报，1998，10（2）：152～155
97 张玉云，熊光楞，李伯虎．并行工程方法、技术与实践．自动化学报，1996，22（6）：44～53.
98 林建平，彭颖红，阮雪榆．基于并行工程的级进模并行 CAD 系统框架的研究，The Proceedings of 4th ICDMT，Malaysia，1997.6：281～285.
99 陈定方、罗亚波．虚拟设计．北京：机械工业出版社，2002
100 严隽琪等．虚拟制造系统的体系结构及其关键技术．中国机械工程，1998，9（11）：60～64
101 周延美等．虚拟现实技术在汽车外形设计中的实现．汽车工程，2001，23（1）：18～20
102 施普尔，克劳舍著．虚拟产品开发技术．宁汝新等译．北京：机械工业出版社，2000


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET



中 国 材 料 工 程 大 典
CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON
第 21 卷 材料塑性成形工程（下）

第 10 篇

塑性成形质量控制与检测

主 编 吕 炎

编 写 吕 炎 单德彬 杨玉英
郭会光 杜忠权 徐文臣

审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会





塑性成形在工业生产中占有很重要的地位，凡是对组织和力学性能要求较高的重要零件一般都需要经过塑性成形。塑形成形件质量的优劣直接影响到产品的性能和寿命，甚至危及安全。因此，提高塑性成形件质量对我国许多重要工业部门的发展有重大意义。

塑性成形件的质量包括外观质量和内部质量，外观质量包括成形件的几何尺寸、形状和表面情况等，内部质量包括成形件的化学成分、宏观组织、显微组织及力学性能等。

塑形成形时，除了必须保证所要求的形状和尺寸外，还必须满足零件在使用过程中的性能要求。塑形成形件的性能取决于其组织和结构（以下简称组织）。不同材料或同一材料不同状态的塑形成形件其性能之所以不同，归根到底都是由其组织决定的。金属的组织与材料的化学成分、冶炼方法、塑性加工过程和热处理工艺等因素有关。其中，热成形过程对成形件的组织和性能有重要影响，尤其对那些在加热和冷却过程中没有同素异构转变的材料，例如，奥氏体和铁素体耐热不锈钢、高温合金、铝合金和镁合金等。对于这些材料主要依靠塑性加工过程中正确控制热力学工艺参数来改善成形件的组织和性能。对同素异构转变的材料，最终组织主要由热处理工艺来确定，但是其中很多材料，例如低合金结构钢、马氏体钢、贝氏体钢、莱氏体高合金工模具钢等，由于锻造工艺不当产生的石状断口、低倍粗晶、碳化物严重偏析等缺陷，用热处理很难消除或无法消除，严重影响材料的性能。因此这些材料的成形件的组织和性能也需依靠塑性加工过程中正确控制热力学工艺来保证。

第 1 章　影响塑性成形件质量的几个主要问题

本章介绍了晶粒度、过热过烧、金属纤维组织、脱碳、白点、折叠、裂纹、空腔和压缩失稳等影响塑性成形件质量的几个主要问题。其中与加热和冷却密切有关的有过热过烧、脱碳和白点；与塑性变形密切有关的有折叠、流线和压缩失稳；与加热和塑性变形密切有关的有晶粒度、裂纹和空腔等。

1　晶粒度

晶粒度是表示金属材料晶粒大小的程度，它由单位面积内所包含晶粒个数来度量，也可用晶粒平均直径大小（用 mm 或 μm）来表示。晶粒度级别越高，说明单位面积中包含晶粒个数越多；也就是说晶粒越细。

金属材料或零件的晶粒大小和形状，随材料或零件的加工工艺过程不同可在很大的范围内变化，而大小不同的晶粒对力学性能及理化性能又有很大的影响，所以在生产实践中要控制晶粒大小。

为了比较晶粒的大小，对各种材料都制定了晶粒度标准。例如对结构钢而言，冶金部规定了八级晶粒度标准。一般认为 1～4 级为粗晶粒，5～8 级为细晶粒。有时遇到晶粒过大或过细而超出 8 级规定范围时，则可适当往两端延伸，如粗晶 0 级、－1 级、……；细晶 9 级、10 级、11 级等。

钢的晶粒度有两种概念：钢的奥氏体本质晶粒度和钢的奥氏体实际晶粒度。

奥氏体本质晶粒度，是将钢加热到 930℃，保温适当时间（一般 3～8 h），冷却后在室温下放大 100 倍观察到的晶粒大小。1～4 级为本质粗晶粒钢，5～8 级为本质细晶粒钢。

钢的奥氏体实际晶粒度，是指钢加热到某一温度（不一定是 930℃，锻造时往往加热到 1 200℃左右，热处理时往往低于 930℃）下获得的奥氏体晶粒大小。具体地说，就是任意一种生产工艺过程后所得到的奥氏体晶粒大小。必须注意的是，这种奥氏体实际晶粒的大小，常被相变后的组织所掩盖，只有通过特殊腐蚀才可以显示出来。

奥氏体本质晶粒度表征钢的工艺特性。而奥氏体实际晶粒度则影响使用性能，所以在某种意义上讲，测定或控制钢的奥氏体实际晶粒度，比测定或控制钢的奥氏体本质晶粒度更有意义。

1.1　晶粒大小对性能的影响

（1）晶粒大小对力学性能的影响

一般情况下，晶粒细化可以提高金属材料的屈服点（σ_s）、疲劳强度（σ_{-1}）、塑性（δ，ψ）和冲击韧度（a_K），降低钢的脆性转变温度。因为晶粒越细，不同取向的晶粒越多，晶界总长度越长，位错移动时阻力越大，所以能提高强度和韧性。因此，一般要求强度和硬度高、韧性和塑性好的结构钢、工模具钢及有色金属，总希望获得细晶粒。

钢的室温强度与晶粒平均直径平方根的倒数成直线关系（见图 10.1-1）。其数学表达式为

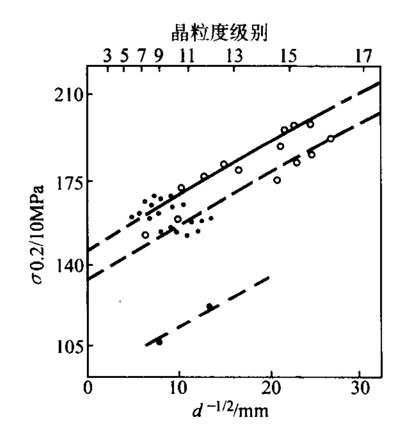


图 10.1-1　晶粒大小对钢的强度影响

$$\sigma = \sigma_0 + Kd^{-\frac{1}{2}}$$

式中，σ 为钢的强度，MPa；σ_0 为常数，相当于钢单晶时的强度，MPa；K 为系数，与材料性质有关；d 为晶粒的平均直径，mm。

合金结构钢的奥氏体晶粒度从 9 级细化到 15 级后，钢的屈服强度（调质状态）从 1 150 MPa 提高到 1 420 MPa，并使脆性转变温度从－50℃降到－150℃。图 10.1-2 为晶粒大小对低碳钢和低碳镍钢冷脆性转变温度的影响。

对于高温合金不希望晶粒太细，而希望获得均匀的中等晶粒。从要求高的持久强度出发，希望晶粒略为粗大一些。因为晶粒变粗说明晶界总长度减少，对以沿晶界黏性滑动而产生变形或破坏形式的持久或蠕变性能来说，晶粒粗化意味着这一类性能提高。但考虑到疲劳性能又常希望晶粒细一点，所以对这类耐热材料一般取适中晶粒为宜。例如 GH2 135 晶粒度对疲劳性能及持久性能的影响：晶粒度从 4～6 级细化到 7～9 级时，室温疲劳强度从 290 MPa 提高到

400 MPa。在700℃下，疲劳强度从400 MPa提高到590 MPa。因为在多数情况下大晶粒试样疲劳断口的疲劳条痕间距较宽，说明疲劳裂纹发展速度较快；而疲劳裂纹在细晶粒内向前推进时，不但受到相邻晶粒的限制，且从一个晶粒到另一个晶粒还要改变方向，这些都可能是细晶能提高疲劳强度的缘故。但是，晶粒细化后持久强度下降，蠕变速度增加。例如晶粒从5级细化到7级时，在700℃下100 h的持久强度从450 MPa下降到370 MPa。而当晶粒度由4～5级细化到10～11级时，在700℃和44 MPa下的最小蠕变速度比原来增加了25～100倍，持久寿命缩短到原来的十分之一。

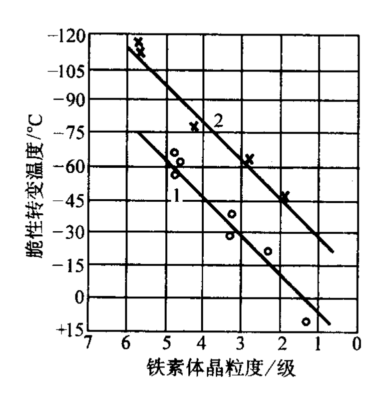


图 10.1-2　晶粒大小对钢的脆性转变温度的影响

1—$w(C)=0.02\%$，$w(Ni)=0.03\%$

2—$w(C)=0.02\%$，$w(Ni)=3.64\%$

（2）晶粒大小对理化性能的影响

1）晶粒大小对晶界腐蚀敏感性的影响。以1Cr18Ni9Ti不锈钢为例（图10.1-3），从图中可以看出粗晶粒钢比细晶粒钢晶界腐蚀敏感性大。

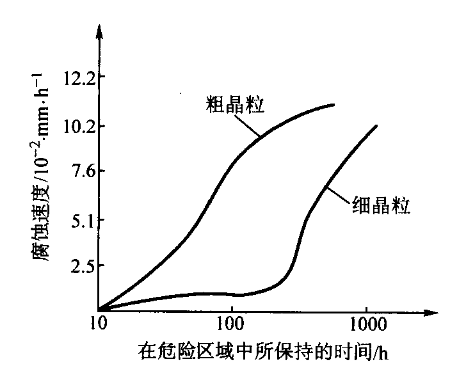


图 10.1-3　晶粒大小对1Cr18Ni9Ti钢抗腐蚀性能的影响

一般说来，粗晶粒使晶界腐蚀的程度加深，抗应力腐蚀能力下降；但重量损失减少，因为粗晶粒比细晶粒的晶界少。

2）晶粒大小对导磁性能的影响。工业纯铁常常作为导磁体广泛用于仪表生产中。室温下纯铁的晶粒尺寸对最大导磁率的影响列于表10.1-1。由表中可以看出，晶粒越大，μ_{max}也越大。

表 10.1-1　工业纯铁晶粒大小对最大导磁率 μ_{max} 的影响

晶粒尺寸/10^{-2}·mm	μ_{max}/H·m^{-1}	晶粒尺寸/10^{-2}·mm	μ_{max}/H·m^{-1}
6.3	$4\pi\times0.000\ 82$	0.6	$4\pi\times0.000\ 697$
2.7	$4\pi\times0.000\ 80$	0.3	$4\pi\times0.000\ 409$
1.2	$4\pi\times0.000\ 73$		

1.2　影响晶粒大小的一些主要因素

（1）加热温度

从热力学条件来看，在一定体积的金属中，晶粒愈粗，则其总的晶界表面积就愈小，总的表面能也就愈低。由于晶粒粗化可以减少表面能，使金属处于自由能较低的稳定状态，因此，晶粒长大是一种自发的变化趋势。晶粒长大主要是通过晶界迁移的方式进行的。要实现这种变化过程，需要原子有强大的扩散能力，以完成晶粒长大时晶界的迁移运动。由于温度对原子的扩散能力有重要影响，因此，加热温度愈高，晶粒长大的倾向愈大。

图10.1-4a、b、c是硅钢片试样的同一部位，在加热升温过程中，在高温显微镜下拍的，由图可知，随着加热温度的不断升高，晶粒不断长大。由于晶界的显示是采用真空热蒸发方式来完成的，所以各阶段的晶界仍被保留下来。

（2）机械阻碍物

一般说来，金属的晶粒随着温度的升高不断长大，几乎成正比关系。但是，也不完全如此。有时加热到较高温度时，晶粒仍很细小，可以说没有长大，而当温度再升高一些时，晶粒突然长大。例如本质细晶粒钢，在加热到950℃之前，晶粒是细小的，之后晶粒则将迅速长大；有些材料，随加热温度升高，晶粒分阶段突然长大。一般称前一种长大方式为正常长大，后一种为异常长大。晶粒异常长大的原因，是金属材料中存在机械阻碍物，对晶界有钉扎作用，阻止晶界的迁移。

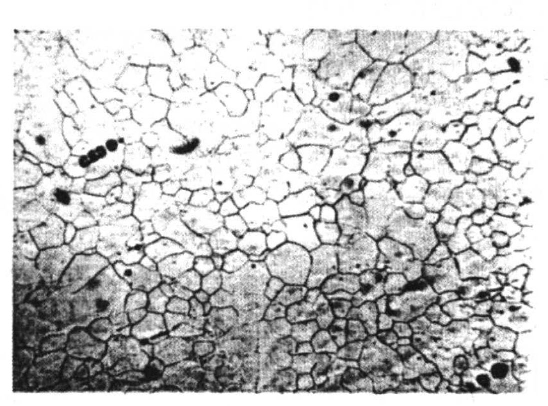
图10.1-5为6A02铝合金中的机械阻碍质点影响晶粒长大的情况。此种质点在晶粒长大时使晶界发生弯曲，不易通过。

同一钢种的电渣重熔钢比电炉钢的过热温度低，晶粒容易粗化，原因是由于前者夹杂物少。

机械阻碍物在钢中可以是氧化物（Al_2O_3等）、氮化物（如AlN、TiN等）和碳化物（VC、TiC、NbC、WC等）等；在铝合金中可以是Mn、Cr、Ti、Fe等元素及其化合物。

第二相质点对晶界迁移阻力愈大，则晶界迁移愈困难，晶粒愈不易长大。第二相质点的总钉扎力与第二相的体积分数和第二相粒子半径有关。第二相质点的体积分数愈大，则晶粒尺寸愈小；第二相体积分数一定时，粒子半径愈小，则总的钉扎力愈大，晶粒尺寸便愈小，反之，便愈大。因此，随着加热温度升高，第二相粒子集聚长大时，由于总的钉扎力减小，晶粒便随之长大。当加热温度很高，机械阻碍物溶入晶内时，晶粒便迅速长大到与其所处温度对应的尺寸大小。由于这些物质溶入基体时的温度有高有低（即稳定性大小不同），存在于钢内的数量有多有少，种类可能是一种或几种同时存在，因此，使晶粒突然长大的温度与程度就有所不同。例如本质细晶粒钢的机械阻碍物主要是AlN和Al_2O_3，它们在950℃之后溶入晶内，阻碍作用便消失，于是，晶粒便迅速长大。图10.1-6为GH220高温合金晶粒尺寸随加热温度变化的情况。GH220中的机械阻碍物主要是γ'相，二次碳化物M_6C，硼化物和一次碳化物TiC，TiCN等。γ'相的固溶温度是1 160℃，M_6C的固溶温度是1 190℃，按图中的曲线可以将晶粒长大的过程分为三个阶段：第一阶段，在1 140℃以下，晶粒尺寸几乎没有变化，在1 140～1 160℃范围内晶粒尺寸突然长大，这是由于γ'相溶解引起的；第二阶段，在1 180～1 200℃范围内，由于M_6C的溶解，促使晶粒更迅速长大；第三阶段，当高于1 220℃时，晶粒继续长大，以至出现粗大晶粒，这是由于晶界微量相（主要是硼化物）的溶解引起的。





(a) 冷轧后在870～880℃保温



(b) 升温到1000～1020℃保温

(c) 升温高于1020℃保温

图 10.1-4　连续加热时硅钢片晶粒不断长大情况　200×

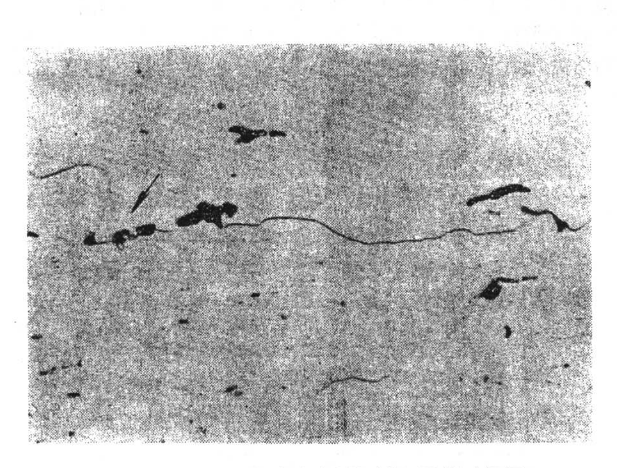


图 10.1-5　6A02 铝合金中的机械阻碍物对晶界迁移的阻碍（箭头所指）　**530×**

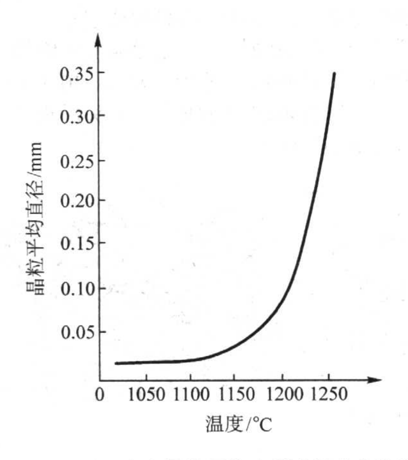


图 10.1-6　GH220 合金晶粒平均直径随温度变化的曲线

应该指出，通常所说的机械阻碍物总是指一些极小的微粒化合物；但是第二相固溶体也可以起机械阻碍作用，阻止晶粒长大。例如，一些铁素体型不锈钢，特别是高铬（$w(\mathrm{Cr})>21\%$）类型的不锈钢，加入少量镍（$w(\mathrm{Ni})\approx 2\%$）或锰（$w(\mathrm{Mn})\approx 4\%$），由于能形成少量奥氏体，使作为基体的铁素体晶粒不易长大，从而提高了材料的韧性。又例如，$\alpha+\beta$ 钛合金中的初生 α 相和 $\alpha+\beta$ 铜合金中的 α 相，可以阻止 β 晶粒长大，当温度超过 β 转变温度时，由于 α 相消失，β 晶粒将迅速长大。

(3) 变形程度和变形速度

变形程度对晶粒大小影响的规律如图 10.1-7 所示。总的看，随着变形程度从小到大，晶粒尺寸由大变小，但是晶粒大小有两个峰值，即出现两个大晶粒区，第一个大晶粒区叫做临界变形区。不同材料和不同变形温度时，临界变形程度的大小不一样，临界变形区是一个小变形量范围。在某些情况下，当变形量足够大时，可能出现第二个大晶粒区。

关于临界变形区晶粒长大的机理，有两种理论：一是按经典理论认为临界变形区粗晶是由于该区变形量小，形核数目少，新晶核靠消耗其周围已变形晶胞而长大；二是近代研

究认为，该区是无形核长大形成的，是由于变形程度小，位错密度低，不足以形成再结晶核心。而某些晶粒由于位向不合适，没有塑性变形或变形很小，于是在加热过程中，这些晶粒的晶界以畸变能差为驱动力向邻近的畸变能高的晶粒内迁移。随着晶界迁移和晶粒长大，这些晶粒与相邻晶粒相比，不仅畸变能小，而且界面曲率小，于是界面曲率又成为新增加的驱动力。因此，晶界迁移的驱动力随着晶粒的长大而增大。在高温下第二相质点的集聚和固溶也加速了这一过程。临界变形区粗晶可能同时按上述两种机理或其中一种机理而形成。

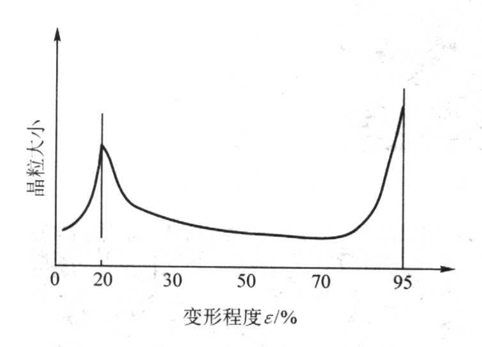


图 10.1-7　再结晶后的晶粒大小与变形程度的关系

当变形量大于临界变形后，金属内部均产生了塑性变形，因而再结晶时，同时形成很多核心，这些核心稍一长大即互相接触了，所以再结晶后获得了细晶粒。

当变形量足够大时，出现第二个大晶粒区。该区的粗大晶粒与临界变形时得到的大晶粒不同，一般称为织构大晶粒。所谓织构，是指在足够大的变形量下，金属内的各个晶粒的某一个晶面都沿着变形方向排列起来，也叫做“择优取向”。由变形产生的织构称“加工织构”或“变形织构”。把已经有了“变形织构”的材料进行再结晶退火，发现再结晶后的晶粒位向与原来变形织构位向几乎一致，这种具有一定位向的再结晶组织，称为再结晶织构或退火织构。图 10.1-7 中出现的第二个大晶粒峰值，是先形成变形织构，经再结晶后形成了织构大晶粒所致。图 10.1-8、图 10.1-9 所示为 6A02 铝合金经大变形后出现的变形织构（箭头所指处）和经再结晶后出现的再结晶织构。



图 10.1-8　6A02 铝合金的变形织构（箭头所指）**210×**

关于第二峰值出现大晶粒的原因还可能是：①由于变形程度大（大于 90%以上），内部产生很大热效应，引起锻件实际温度大幅度升高；②由于变形程度大，使那些沿晶界分布的杂质破碎并分散，造成变形的晶粒与晶粒之间局部地区直接接触（与织构的区别在于这时互相接触的晶粒位向差可以是比较大的），从而促使形成大晶粒。

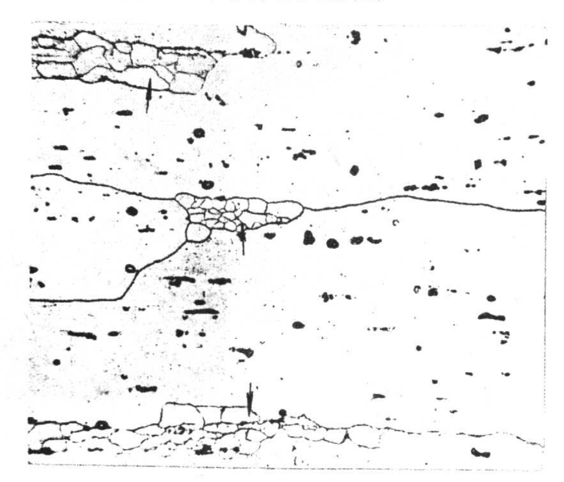


图 10.1-9　6A02 铝合金中的再结晶结构（箭头所指）**210×**

（4）固溶处理前的组织情况

固溶处理后的晶粒大小除了受固溶温度和机械阻碍物质的影响外，受固溶加热前的组织情况影响很大。如果锻后是未再结晶组织，而且处于临界变形程度时，固溶处理后将形成粗大晶粒；如果锻后是完全再结晶组织，固溶处理后一般可以获得细小而较均匀的晶粒；如果锻后是不完全再结晶组织，即半热变形混合组织，固溶加热时，由于各处形核的时间先后、数量多少和长大条件等不一样，固溶处理后晶粒大小将是不均匀的。以 GH2135 高温合金为例，图 10.1-10 为其固溶处理时的再结晶立体图。图上点划线是表示各种变形温度和变形程度下热变形后的晶粒大小。由于这种合金的再结晶温度高，再结晶速度慢，锻后常常出现未完全再结晶或未再结晶的组织。当锻后是未再结晶组织，且变形量处于临界变形区时，由图中可以看出，固溶处理后将形成粗晶。在非临界变形区范围内，如果锻后是半热变形的混合组织，虽然固溶处理后平均晶粒度不大，但是晶粒的不均匀程度较大。这对零件的力学性能是很不利的。

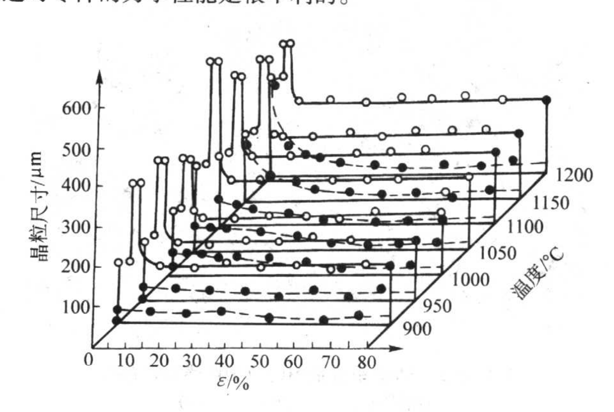


图 10.1-10　GH2135 合金固溶再结晶图（图中虚线是 GH2135 合金的第二类再结晶图）

GH4033 合金也是再结晶温度高、再结晶速度慢的一种材料。某厂在锻 GH4033 合金的小型锻件时，锻前加热温度选用 1 100℃，经平锻机一次锻造成形，固溶处理后因晶粒粗大导致了产品的报废。而将锻前加热温度提高后就得到了合格的晶粒组织。锻前加热温度选用 1 100℃，虽然高于再结晶温度，但由于锻件尺寸较小，在操作过程中温度降低很快，所以变形时坯料的实际温度已接近或低于再结晶温度，于是经锻造和固溶处理后得到的是晶粒粗细不均的组织。后



来，适当提高加热温度，虽然在操作过程中坯料温度会有所降低，但变形终了时仍能保证在再结晶温度以上，最后得到的是均匀的细晶组织。

除以上四个因素外，化学成分和原始晶粒度对晶粒尺寸也有不同程度的影响，在此不再一一讨论了。

1.3　细化晶粒的途径

1）在原材料冶炼时加入一些合金元素（钽、铌、锆、钼、钨、钒、钛等等）及最终采用铝和钛作脱氧剂等工艺措施来细化晶粒。它们的细化作用主要在于：当液态金属凝固时，那些高熔点化合物起结晶核心作用，从而保证获得极细的晶粒。此外，这些化合物同时又都起到机械阻碍作用，使已形成的细晶粒不易长大。

2）采用适当的变形程度和变形温度也能达到细化晶粒的目的。例如在设计模具和选择坯料形状、尺寸时，既要使变形量大于临界变形程度，又要避免出现因变形程度过大而引起的激烈变形区，并且模锻时应采用良好的润滑剂，以改善金属的流动条件，使其变形均匀。锻件的晶粒度主要取决于终锻温度下的变形程度。

碳素结构钢和合金结构钢的临界变形程度范围列于表 10.1-2 中。

表 10.1-2　碳素结构钢和合金结构钢的临界变形程度范围

锻造温度/℃	碳素结构钢/%	合金结构钢/%
850	6 ~ 10	5 ~ 15（ < 20）
900 ~ 1 000	2.5 ~ 20	5 ~ 15（ < 20）
1 100	0 ~ 20	5 ~ 20
1 200	0 ~ 30	5 ~ 20（ < 20）

锻造时应恰当控制最高热加工温度（既要考虑到加热温度，也要考虑到热效应引起的升温），以免发生聚合再结晶。如果变形量较小时，应适当降低热加工温度。

终锻温度一般不宜太高，以免晶粒长大。但是对于高温合金等无同素异构转变的材料，终锻温度又不宜太低，不应低于出现混合变形组织的温度。

生产实践表明 38 Cr 和 40 CrNiMoA 等钢种终锻温度也不宜过低，否则，本质晶粒度级别将增大。这是由于在较低温度锻造时，有部分 AlN 析出，热处理加热时，AlN 便在已存在的 AlN 颗粒上继续析出，使 AlN 的颗粒粗大，机械阻碍作用减小的缘故。因此，这些钢的终锻温度一般高于 930℃。

3）采用锻后正火（或退火）等相变重结晶的方法来细化晶粒。必要时利用奥氏体再结晶规律进行高温正火来细化晶粒。

4）将材料加热到相变点以上，并迅速冷却，这样反复数次的急热急冷可以获得超细晶粒。急热时，在获得一定过热度的情况下，可产生大量晶核。急冷使晶核不能迅速长大。例如 GCr15 材料快速加热到 800 ~ 850℃，用冰盐水冷却，反复四次可获得超细晶粒。

2　过热、过烧

锻造工艺过程中，如果加热温度控制不当，常常容易引起锻件过热的现象。过热将引起材料的塑性、冲击韧度、疲劳性能、断裂韧度及抗应力腐蚀能力下降。例如 18Cr2Ni4WA 钢严重过热后，冲击韧度由 0.8 ~ 1.0 MJ/m^2 下降为 0.5 MJ/m^2。

一般认为，金属由于加热温度过高或高温保温时间过长而引起晶粒粗大的现象就是过热。至于晶粒粗大到什么程度算过热，应视具体材料而有所不同。碳钢（包括亚共析钢和过共析钢）、轴承钢和一些铜合金，过热之后往往出现魏氏组织（见图 10.1-11）；马氏体和贝氏体钢过热之后往往出现晶内织构组织（见图 10.1-12）；1Cr18Ni9Ti、1Cr13 和 Cr17Ni2 等不锈钢过热之后 α 相（或 δ 铁素体）显著增多；工模具钢（或高合金钢）往往以一次碳化物角状化为特征判定过热组织（见图 10.1-13）。钛合金过热后出现明显的 β 晶界和平直细长的魏氏组织（见图 10.1-14），这些通过金相检查便可以判定。对铝合金的过热现在没有明确的判定标准。

一般过热的结构钢经正常热处理（正火、淬火）之后，组织可以得到改善，性能也随之恢复。但是 Cr—Ni、Cr—Ni—Mo、Cr－Ni—W、Cr—Ni—Mo—V 系多数合金结构钢严重过热之后，冲击韧度大幅度下降，而且用正常热处理工艺，组织也极难改善，因此对过热组织，按照用正常热处理工艺消除的难易程度，可以分为不稳定过热和稳定过热两种情况。不稳定过热是用热处理方法能消除所产生的过热组织，亦称一般过热；稳定过热是指经一般的正火（包括高温正火）、退火或淬火处理后，过热组织不能完全消除。合金结构钢的严重过热常常表现为稳定过热。碳钢、9Crl8 不锈钢、轴承钢、弹簧钢中也发生类似情况。

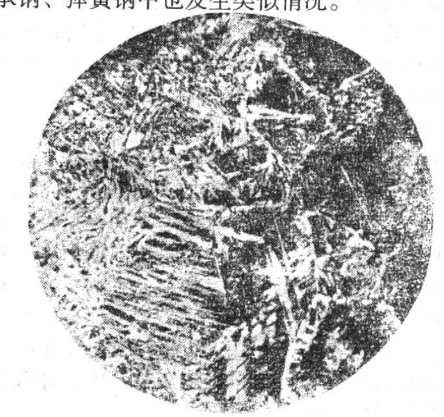


图 10.1-11　过热的魏氏组织　100×

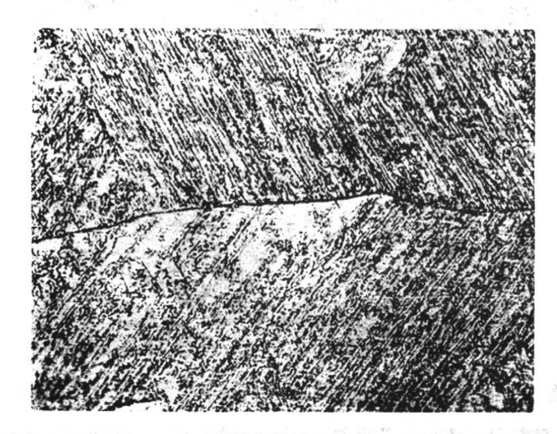


图 10.1-12　20Cr2Ni4A 钢模铸件晶内结构（全部织构）　320×

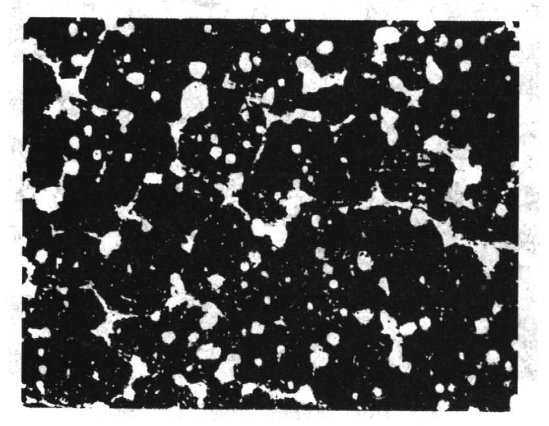


图 10.1-13　W18Cr4V 钢的过热组织　500×

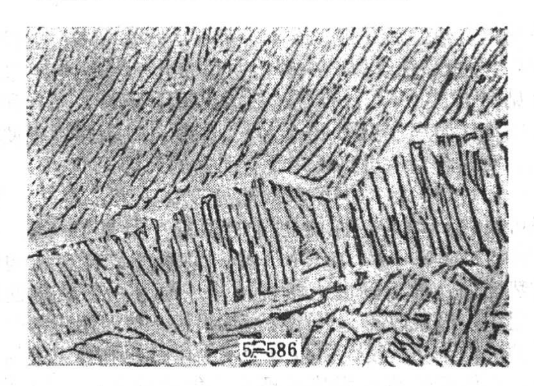
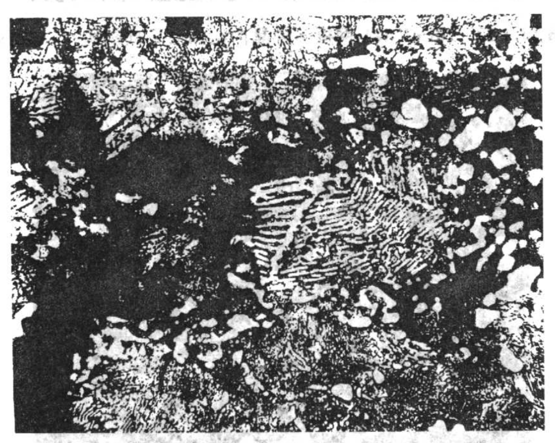


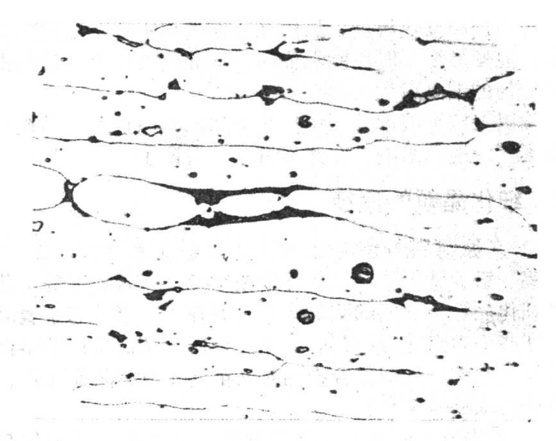
图 10.1-14 钛合金过热的魏氏组织 500×

过烧，加热温度比过热的更高，但与过热没有严格的温度界限。一般以晶粒边界出现氧化及熔化为特征来判定过烧。如对碳素钢来说，过烧时晶界熔化、严重氧化（见图10.1-15），工模具钢（高速钢、Cr12MoV 等钢）过烧时，晶界因熔化而出现鱼骨状莱氏体（见图 10.1-16）。铝合金过烧时，出现晶界熔化三角区和复熔球等现象（见图 10.1-17）。锻件过烧后往往无法挽救，只好报废。

下面侧重介绍稳定过热的机理及影响的因素。应当指出，这里讨论的稳定过热是对有同素异构转变的钢而言的。对没有同素异构转变的金属材料根本不存在这种问题，因为只要过热就是稳定的，用热处理的办法不能消除。对于有同素异构转变的钢，明确提出稳定和不稳定的概念，对指导锻压和热处理工艺具有重要的实际意义，因为在实际生产中，有时将稳定过热的锻件按不稳定过热的情况进行处理，结果，稳定过热引起的缺陷组织遗传在零件中，降低材料的性能，甚至在使用中造成严重事故。


图 10.1-15 50A 钢过烧组织（4%硝酸酒精溶液腐蚀） 150×


图 10.1-16 锻裂处过烧的组织 250×


图 10.1-17 2A02 合金的过烧组织 500×

（α+β）钛合金和（α+β）铜合金虽有同素异构转变，但过热之后也不能用热处理方法消除，性能显著下降。一些双相不锈钢，如 1Cr18Ni9Ti、1Cr13、Cr17Ni2 等，过热之后 α 相（或铁素体）显著增加，使性能降低，用热处理方法也不易改善和恢复。

在钢中引起稳定过热的机理有两种：①由析出相引起的稳定过热；②由于晶粒遗传（组织遗传）引起的稳定过热。

2.1 析出相引起的稳定过热

（1）析出相引起的稳定过热的机理

钢在奥氏体区加热，随着温度升高，奥氏体晶粒粗大，特别是在机械阻碍物大量固溶于奥氏体以后，晶粒迅速长大，高温固溶于奥氏体的第二相（例如硫化锰），在冷却过程中沿原高温奥氏体晶界（或孪晶界）析出。由于它们的固溶温度高（一般都在 1 000℃以上），因此，一般热处理（淬火、退火、正火）时，在较低的奥氏体化温度（除莱氏体工具钢外都低于 930℃）下，不再溶入基体。因此，这些第二相的分布、大小、形态和数量不会有多大程度的改变或基本不变，形成了稳定的原高温奥氏体晶界（或孪晶界）。概括起来就是：稳定过热是指钢过热后，除原高温奥氏体晶粒粗大外，沿奥氏体晶界（或孪晶界）大量析出第二相质点或薄膜，以及其他促使原高温奥氏体晶界（或孪晶界）或其他过热组织稳定化的因素，这种过热用一般热处理的方法（扩散退火除外）不易改善或不能消除。

存在有稳定过热组织的零件受力时，沿晶界（或孪晶界）析出的第二相质点，常常是促成微观裂纹的起因，引起晶界弱化，促使沿原高温奥氏体晶界（或孪晶界）断裂（尤其当基体韧性较好时）。图 10.1-18 为裂纹沿有析出相的原奥氏体晶界扩展的情况。过热温度越高，高温稳定相固溶的越多，晶粒越粗大，冷却时析出的密度也愈大。这样的过热组织也愈稳定，晶界弱化也愈严重。

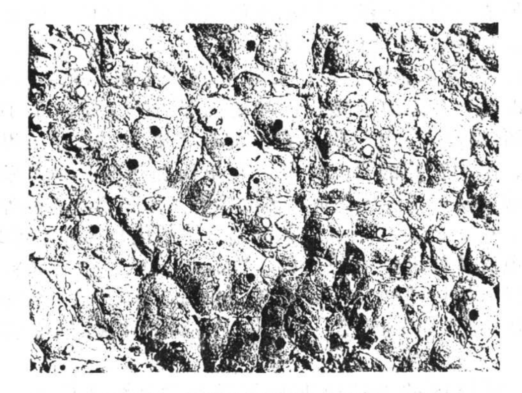

图 10.1-18 断裂沿析出相网络扩展 160×



近年来研究结果表明，引起稳定过热的析出相不仅有硫化物（MnS），还有碳化物、氮化物、硼化物（$M_{23}CB$）以及碳氮化钛（TiCN）、硫碳化钛（Ti_2SC）等。

例如 Cr—Ni、Cr－Ni—W 和 Cr—Ni—Mo 系合金结构钢稳定过热后，大量析出的主要是较细的 MnS。图 10.1-19 为 35CrNiMo 钢过热石状断口，图 10.1-20 为石状断口过热小平面微观形态，是 MnS 为显微裂纹核心的沿晶孔坑型断裂。


图 10.1-19 35CrNiMo 钢石状断口 500×


图 10.1-20 石状断口的微观形态 5000×

除合金结构钢出现稳定过热外，在碳钢、9Cr18 不锈钢、GCrl5 轴承钢、60SiMo 弹簧钢、高速钢等钢种也常出现这种缺陷，而且不仅沿奥氏体晶界析出，沿孪晶界也有析出。

形成稳定过热的充分和必要条件是：①高温加热使奥氏体晶粒粗化；②冷却后沿原高温奥氏体晶界（或孪晶界等）大量析出高温稳定的第二相或者存在其他促使原高温奥氏体晶界稳定和弱化的因素。必须指出，单纯奥氏体晶粒粗化引起的过热只是一种不稳定过热；而奥氏体晶粒不粗大，单纯由大量第二相沿晶界析出引起的原奥氏体晶界弱化不属于过热问题。

(2) 影响稳定过热与不稳定过热的主要因素

由析出相引起的稳定过热程度，主要取决于析出相的成分和析出的密度。因此，影响稳定过热与不稳定过热的主要因素除与加热温度高低和保温时间长短有关外，还主要和钢的化学成分、钢中微量元素（包括杂质元素）及含量、过热后的冷却速度、锻造变形程度等有关。

奥氏体晶粒愈粗大，愈易沿晶界析出。析出相的密度愈大，则沿晶界封闭的愈完整。如果沿奥氏体晶界析出的密度小或不完全封闭，则稳定性小。因此，在奥氏体晶粒大小一定的条件下，沿原高温奥氏体晶界析出相的密度大小，就决定着稳定程度的大小。如果析出相的质点很大，但密度极低，也不易形成稳定过热。

1）钢的化学成分及微量元素的影响。由前面的例子中可以看出，钢的化学成分决定着析出相的种类，例如 Cr—Ni、Cr—Ni—Mo—V、Cr—Ni—W 系合金结构钢中的析出相是 MnS；25MnTiB 钢中由于 Ti 与 S 比 Mn 与 S 有更大的亲和力，主要析出 Ti_2SC、Ti（CN）等；而在高碳的 9Cr18 不锈钢中主要析出一次碳化物。

不同成分的析出相固溶于奥氏体中的温度不同，因而对稳定程度有重要影响。例如 MnS、AlN 大量固溶的温度约在 1 200℃左右，TiCN 的固溶温度在 1 350℃左右，Ti_2SC 在 1 350℃ 时还没有固溶。9Cr18 不锈钢的一次碳化物固溶温度也在 1 000℃以上。析出相的固溶温度愈高，高温愈稳定，形成稳定过热的敏感性则愈低，但一经固溶和析出后，则很难消除。

2）过热后冷却速度的影响。过热后冷却速度对是否形成稳定过热及其稳定程度有重要影响，它影响着析出相的数量和密度。冷却速度过快，第二相可能来不及沿晶界析出；冷却速度过于缓慢则析出相聚集成较大的质点，这两种情况均不易形成稳定过热。只有在第二相充分析出而又来不及聚集的冷却速度下才易形成稳定过热。因此相对的中等冷却速度最易形成稳定过热。

3）塑性变形的影响。塑性变形可以破碎过热形成的粗大奥氏体晶粒并破坏其沿晶界析出相的连续网状分布，因此可以改善或消除稳定过热。

根据以上分析，为避免锻件稳定过热，从锻造工艺方面有下列有效对策。

① 严格控制加热温度，尽可能缩短高温保温时间。加热时坯料应避开炉子的局部高温区。

② 保证锻件有足够的变形量，一般当锻造比为 1.5～2 时，便有明显效果，锻造比愈大，效果愈显著。对模锻件来说，如预制坯后需再一次加热时，应保证锻件各部分均有适当的变形量。

③ 适当控制冷却速度。

根据我们协同某厂解决炮尾锻件石状断口的体会，恰当地采用上述对策，便可以有效地避免形成稳定过热石状断口。

2.2 晶粒遗传引起的稳定过热

按传统的概念，钢在加热至正火温度时即发生相变和重结晶，使粗大晶粒得到细化。但是，有些钢种（主要是马氏体钢和贝氏体钢）过热后形成的粗晶，经正火后仍为粗大晶粒（指奥氏体晶粒）。这种部分或全部由原粗大奥氏体晶粒复原的现象称为晶粒遗传。

马氏体和贝氏体钢锻件，如果锻造加热温度与停锻温度较高和变形程度较小，容易形成粗大的奥氏体晶粒，冷却到室温后，在原来的一颗颗粗大奥氏体晶粒内，由于相变形成许多颗小晶粒，这些小晶粒的空间取向与原来奥氏体晶粒的空间取向保持一定的关系。例如马氏体的｛110｝面平行于奥氏体的｛111｝面，马氏体的＜111＞方向平行于奥氏体的＜110＞方向。从一个奥氏体晶粒形成的许多马氏体片与原奥氏体晶粒之间都有着这种位向关系（见图 10.1-21 和图 10.1-12）。也就是说，形式上是一颗大晶粒分割成许多颗小晶粒，而实质上还是原来的一颗大晶粒。正火加热时，这些小晶粒还原成原来的奥氏体晶粒，且空间取向基本上没有多大的变化。正火冷却时，一颗奥氏体晶粒又再次重新分割成若干个小晶粒。这样，正火前（即锻后）原来粗大的奥氏体晶粒经正火后形式上虽细化了（分割成许多小晶粒），但实质上由于很多小晶粒的位向与原来的奥氏体晶粒一致，由于在位向和大小上都继承了原始粗大奥氏体晶粒，所以在性能

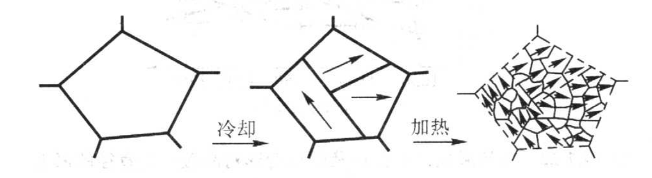


图 10.1-21 马氏体、贝氏体钢过热组织加热时的重结晶示意图

与断口上仍保留了原来粗大奥氏体晶粒的特征。这种粗大晶粒的遗传，使材料的力学性能，特别是韧性明显降低。由于这种晶粒遗传现象，马氏体钢、贝氏体钢锻件过热后的粗大奥氏体晶粒，用一般热处理工艺不易细化。

产生晶粒遗传的条件如下。

1）加热前的组织为奥氏体的有序转变产物（马氏体或贝氏体），它具有保留原始奥氏体晶粒取向的能力。

2）加热至奥氏体化温度时，铁素体和奥氏体均不发生再结晶，保持晶粒位向。

3）针状奥氏体得到充分发展。马氏体、贝氏体组织在加热相变时可能产生两种奥氏体形态，即针状（条状）奥氏体和球状奥氏体。针状奥氏体与母相保持一定的位向关系，才导致晶粒遗传，而球状奥氏体则不然。

某些珠光体类型的钢，例如 38CrMoAlA 钢等，也易出现这种晶粒遗传现象。38CrMoAlA 钢在退火状态是珠光体加铁素体，由于 Cr 和 Mo 的存在，使 C 曲线（S 曲线）右移，尤其当存在成分偏析时，在空冷状态下也常常得到贝氏体组织（局部）。经正火和调质后，该局部处组织仍明显保留位向关系，奥氏体晶粒尺寸变化也不大。

（1）影响晶粒遗传的几个因素

晶粒遗传的程度与锻件的过热程度、变形程度、加热速度、原始组织、化学成分等有关，分别介绍如下。

1）过热程度。材料过热程度愈严重，晶粒遗传的程度也愈严重。由图 10.1-22 中可以看到，加热温度愈高时，奥氏体晶粒愈粗大，合金元素固溶的愈充分，愈均匀，冷却和以后加热时，愈易按有序转变的方式进行，保持位向关系。

2）变形程度。塑性变形对消除晶粒遗传有重要作用。由图 10.1-22 还可以看到，经 1 250℃加热后的坯料，经 66% 的变形后晶粒明显细化。这不仅是由于塑性变形时破碎了晶粒，打乱了组织的方向性，而且提供了足够的畸变能以满足晶粒细化时晶界能增加的需要。于是，在正火加热温度稍高于相变点时将促使 α—按无序转变的方式形成奥氏体，破坏了原来的空间取向，所以相变后晶粒将得到充分的细化。

在实际生产中，锻件过热和局部区域处于小变形或临界变形的情况是经常存在的。因此，锻件中晶粒遗传的情况是经常出现的。

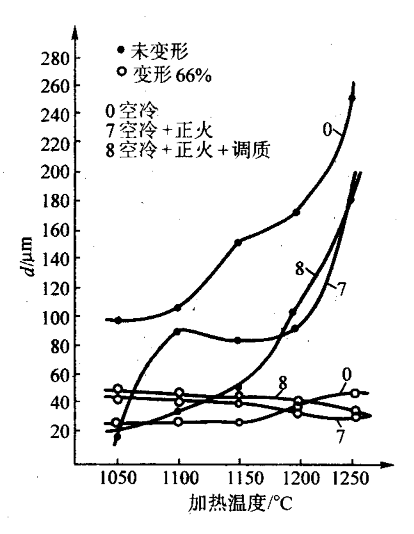


图 10.1-22 加热温度、热处理及塑性变形对晶粒平均直径的影响

3）加热速度。B.A. 萨多夫斯基在他的《钢的组织遗传性》一书中认为钢的晶粒遗传与临界区的加热速度有关。在合金结构钢中，原始组织为马氏体时，缓慢加热（1 ~ 50℃/min）和极快速加热（> 100 ~ 500℃/s）时都易出现晶粒遗传。但在某些中间加热速度（100℃/min ~ 100℃/s）时，晶粒遗传性不存在。加热速度不仅影响相变驱动力，而且还影响相变硬化效应的大小和再结晶温度的高低，从而影响晶粒遗传性。

4）原始组织。原始组织对晶粒遗传性有较大影响，晶粒遗传主要发生在马氏体、贝氏体组织中，而铁素体 - 珠光体组织一般不发生晶粒遗传。

在具有位向的组织（马氏体、贝氏体）中，贝氏体组织在加热时最不利于球状奥氏体的形成，因此，贝氏体组织的晶粒遗传性最严重。这是由于：①贝氏体的形成温度高于马氏体，它的位错密度和储藏能比马氏体低。贝氏体是一种比马氏体较为稳定的组织，在加热时，贝氏体保持其形态结构的稳定性远比马氏体为高。②贝氏体加热相变时，其相变硬化效应比马氏体低，故再结晶温度高，晶粒遗传性严重。

5）化学成分。化学成分对晶粒遗传有较大影响，它是通过形成一定的组织结构和组织状态来实现的。使 C 曲线右移，促使形成马氏体、贝氏体的合金元素（如 Cr、Ni、Mo 等）易引起晶粒遗传，强烈形成碳化物的元素（如 Ti、V、Nb 等）对晶粒遗传的影响更为显著。这是由于 Ti、V、Nb 等形成的碳化物、氮化物沉淀在条束间以及原始奥氏体晶界，由于它们的稳定性高，在重新加热时不易溶解，于是，就容易把马氏体、贝氏体的轮廓和原始奥氏体晶界固定下来。在 $\alpha\rightarrow\gamma$ 相变时，这些高温稳定的化合物抑制再结晶，于是奥氏体便继承了原始的位向，形成原始粗大晶粒的恢复。只有加热到 1 000 ~ 1 100℃，随着这些阻碍物的逐渐溶解和奥氏体再结晶的产生，粗大的旧晶粒才能被细小的晶粒所代替。

奥氏体区的冷却速度和预回火对晶粒遗传也有一定影响。

（2）防止和消除晶粒遗传的措施

为防止和消除晶粒遗传可采用如下措施。

1）避免锻前加热温度过高，尤其对含有 V、Ti、Nb 等元素的高淬透性钢，更应严格控制加热温度。

2）避免锻件上存在小变形或临界变形的区域，尤其当坯料加热温度较高时，应使各部位均有足够的变形量。

3）大锻件锻造后，在奥氏体区应缓慢冷却或在奥氏体温度下采用较长的保温时间；采用中间重结晶退火或长时间高温回火加退火。

4）锻后热处理应尽可能获得铁素体-珠光体组织，将原始晶粒内的位向打乱，这是消除晶粒遗传的最有效的办法。但是，晶粒遗传主要出现在高合金钢中，而高合金钢的奥氏体极为稳定，例如 26Cr2Ni4MoV 钢等温转变成珠光体的孕育期长达 7 h，生产中难以实现。近来的研究表明，采用降低奥氏体化温度，以减少奥氏体的合金化程度，从而使奥氏体稳定性降低的办法，可有效地得到珠光体转变。

5）采用两次或多次正火。因为每经过一次正火加热和冷却，位向关系就可能遭到一些破坏，经过多次加热和冷却，晶体学位向关系就可能基本被破坏，从而消除晶粒遗传。

6）对奥氏体稳定性高（尤其含有了 Ti、V、Nb 等元素）的合金钢和截面尺寸大的重要锻件，可采用高温正火（退火）或反复高温正火（退火）的方法。因为在 $\alpha\rightarrow\gamma$ 的转变过程中比容发生变化，晶粒间产生相变内应力，使晶粒变形，产生了畸变能，在高温奥氏体区发生奥氏体再结晶，由于重新形核和长大，破坏了原来的空间取向，从而可使奥氏体晶粒细化。

7）应尽量提高 650 ~ 800℃区间的加热速度，切勿在 Ac_1 温度附近保温或缓慢加热。大锻件在 600℃左右保温后，应以最大速度加热到奥氏体再结晶温度，以减小晶粒遗传。

2.3　过热对力学性能的影响

对只是晶粒粗大的过热情况（不稳定过热），当试样主要呈穿晶韧窝断裂时，对力学性能影响不大；当试样呈穿晶解理断裂或沿晶脆性断裂时，晶粒越大，塑性和冲击韧度下降也越大。对稳定过热，例如晶粒粗大并同时有夹杂物沿原奥氏体晶界析出的情况，其试样断口呈穿晶韧性和沿晶韧窝的混合断裂或沿晶韧窝断裂。过热愈严重，“过热小平面”尺寸在断口上所占的比例愈大时，塑性指标和冲击韧度降低也愈显著。过热还影响材料的疲劳强度和断裂韧度，特别是严重过热时，使疲劳强度和断裂韧度下降较大。表 10.1-3 和 10.1-4 列出了过热对 45 钢和 18Cr2Ni4WA 钢力学性能影响的数据，过热对 40CrMnSiMoVA 钢和 40CrNiMoA 钢疲劳强度和断裂韧度的影响见表 10.1-5 和表 10.1-6。

表 10.1-3　过热对 45 钢力学性能的影响

状　态	力　学　性　能				
	σ_b/MPa	σ_s/MPa	δ/%	ψ/%	a_K/(MJ/m^2)
过热后具有粗大晶粒者	462	337	15.5	24.5	0.16
过热后出现严重魏氏组织	535	344	9.5	17.5	0.13
过热后经细化晶粒处理	683	451	26.1	51.5	0.54

表 10.1-4　18Cr2Ni4WA 钢的过热对力学性能的影响

序号	断　口　形　态	力　学　性　能				
		σ_b/MPa	σ_s/MPa	δ/%	ψ/%	a_K/（MJ/m^2）
1	正常纤维状断口	1 200	1 100	14.0	54.0	0.80
2	纤维状断口＋极小“过热小平面”	1 190	1 035	11.0	42.5	0.79
3	纤维状断口＋分散“过热小平面”	1 170	1 010	11.0	42.5	0.79
4	纤维状断口＋密集“过热小平面”	1 150	980	12.5	42.5	0.55
5	纤维状断口＋中等“过热小平面”	1 130	980	11.0	41.0	0.50

表 10.1-5　过热对 40CrMnSiMoVA 钢疲劳强度和断裂韧度的影响

加热温度/℃	低倍情况	取样方向	周　期　强　度			断裂韧度
			K	σ_{mex}/MPa	N_p/次	（MPa·m$^{\frac{1}{2}}$）
1 350	严重低倍粗晶	纵向	0.6	1 460	1 260	62
1 250	轻微低倍粗晶	纵向	0.6	1 460	1 422	66.7
1 150	无低倍粗晶	纵向	0.6	1 460	1 654	77.2

表 10.1-6　过热对 40CrNiMoA 钢锻件弯曲疲劳性能的影响

状　态	σ_{-1}/MPa
正常	500
过热	475
严重过热	450

按传统概念，钢料过热后，出现魏氏组织，使性能下降。但近来一些研究结果认为，经同样温度奥氏体化后，生成魏氏组织的试样较生成等轴铁素体加珠光体的试样有较高的冲击韧度、较低的脆性转变温度和较大的韧性储备，过热形成粗晶，降低钢的冲击韧度，而魏氏组织则提高钢的韧性。因此，过热时冲击韧度的降低主要是由晶粒粗大引起的。

3　金属纤维组织（流线）

金属中的杂质、化合物、偏析等在低倍试片上沿主变形流动方向呈纤维状分布的组织称为金属纤维组织或流线。

这种纤维组织，是铸锭中的杂质、化合物和偏析在热塑性变形（锻压、挤压或轧制）过程中发生形态改变而形成的。铸锭中的脆性杂质和化合物（例如钢中的硅酸盐、氧化物、碳化物和氮化物，铝合金中的 α、β 杂质相、Cu_2Al、Mg_2Si、S 相、T 相等）在变形时被破碎，顺着金属主变形流动方向伸长，并呈碎粒状或链状分布；铸锭中的塑性杂质和化合物（例如，钢中的硫化物等）变形时随着金属一起变形，沿主变形流动方向伸长，并呈带状分布。大多数类型的杂质和化合物在再结晶后，沿主变形流动方向的分布不能改变，所以热变形后的金属组织具有一定的方向性。同时，单向变形越大，金属纤维的方向性也越明显（见图 10.1-23）。

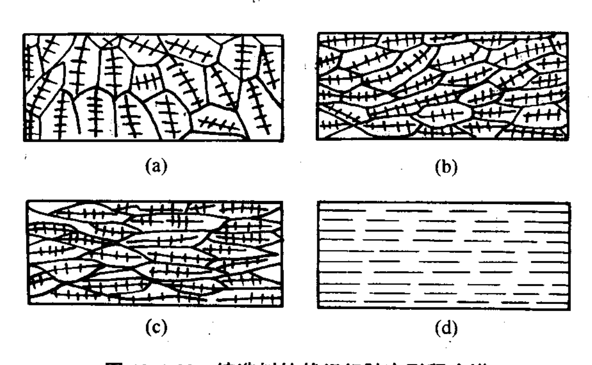


图 10.1-23　铸造树枝状组织随变形程度增大逐渐变为纤维组织的示意图

树枝状晶粒主杆上的高熔点金属与枝晶间的低熔点金属和杂质的抗化学腐蚀性能不一样，如果未经均匀化处理，塑性变形后在宏观上也呈流线形式。

因此，金属纤维组织形成的条件是：其一，金属内存在有杂质、化合物和铸造结晶时的偏析等，这是形成金属纤维组织的内因。其二，金属沿某一方向应有足够大的变形程度（锻比），这是形成金属纤维组织的外因。

3.1　纤维组织对性能的影响

纤维组织的出现，使金属的性能在不同方向上有明显的差异，即呈现异向性，下面讨论纤维组织对各种性能的影响。

(1) 对力学性能的影响

表 10.1-7 中列出了几种材料纤维方向对常规力学性能的影响。由表中可以看出，流线方向对强度指标影响不大，而对塑性指标影响很大。但不同材料，影响的程度各不一样。

表 10.1-7　纤维方向对不同材料常规力学性能的影响

材料	取样方向	机械性能（平均值）					
		σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	ψ/%	HB	a_b/MJ·m^{-2}
45	纵向（0°）	715	470	17.5	62.8	—	0.62
	横向（90°）	672	440	10	31	—	0.30
40CrNiMoA	纵向（0°）	1 054	952	18.2	63.5	3.41	1.48
	横向（90°）	1 054	952	16.0	55.0	3.43	1.14
	弦向（45°）	1 056	955	17.3	62.1	3.43	1.37
30CrMnSiA	纵向（0°）	1 195	1 086	53.7	14.2	—	0.9
	横向（90°）	1 160	1 075	45.0	10.1	—	0.67
	弦向（45°）	1 187	1 032	53.4	14.1	—	0.85
30CrMnSiNi2A	纵向（0°）	1 655	—	12.5	47.3	—	0.763
	横向（90°）	1 633	—	8.5	27.6	—	0.529
	弦向（45°）	1 662	—	11.4	44.4	—	0.753
6A02（模锻件）	纵向（0°）	300	220	12	—	—	—
	横向（沿宽度）	270	—	4	—	—	—
2A50（模锻件）	纵向（0°）	390	280	10	—	—	—
	横向（沿宽度）	370	250	7	—	—	—
	横向（沿高度）	350	—	5	—	—	—
2A14	纵向（0°）	410	280	10	—	—	—
	横向（沿宽度）	380	250	7	—	—	—
	横向（沿高度）	350	—	5	—	—	—

纤维方向对塑性指标之所以影响很大，是因为沿材料流线分布有大量脆性杂质和化合物等。所以，横向试样受拉伸应力应变时，将以这些异向质点为核心形成显微孔洞，并不断扩大和连接成大裂纹。孔洞的排列方向与纤维的方向是一致的，因此横向试样在不太大的拉伸变形之后，裂纹便贯穿试样的整个横断面，使试样发生断裂，而纵向试样则不然（见图 10.1-24）。

纤维组织对不同材料横向塑性指标的影响程度不一样，是因为不同材料的杂质和化合物的种类、性质和含量不一样。例如，硫化锰与铁的结合力弱，在较小的塑性变形后便与基体分离，在硫化锰与基体的交界处发生开裂。而 Fe_3C 与铁的结合力较强，需在较大的塑性变形后才能与基体分离，或本身被折断。

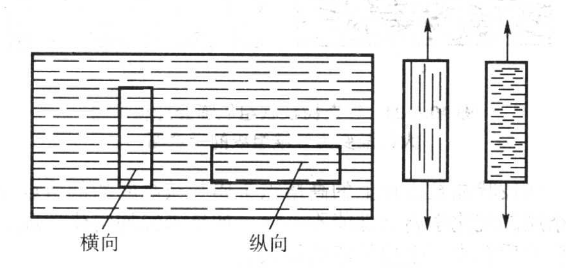


图 10.1-24　不同纤维方向的试样及其拉伸示意图

(2) 对使用性能的影响

纤维方向对接触疲劳性能有很大影响。以轴承而言，影响轴承寿命的主要破坏形式是疲劳剥落，而轴承的疲劳剥落与纤维组织有很大关系。试验表明，材料的疲劳剥落都发生在纤维露头的地方。例如，试验一批轴承时，钢球有 78%，套圈有 91%是在流线露头的地方破坏。因此，无论是钢球或套圈，金属纤维与工作表面平行为最好，与工作表面所成的角度越大越不好，垂直于工作表面为最差。例如，310 轴承套圈的试验数据表明，用钢管车削的套圈，因为沟道部位纤维被切断，平均寿命最低（4 892 h）；而钢管辗出沟道的套圈，纤维与工作表面平行，纤维分布最理想，平均寿命也最高（8 509 h）；平锻的套圈，纤维分布混乱，平均寿命为 5 847 h。

纤维分布对疲劳极限的影响也很大，因为疲劳破断时的最初裂纹最易在表面出现。而纤维露头的地方在微观上是一个缺陷，容易成为应力集中处，在重复和交变载荷的作用下常易成为疲劳源。因此，应当使纤维与零件几何外形相一致。例如，6 160 曲轴全纤维锻造后，疲劳极限提高了 30%以上。

纤维分布情况对抗腐蚀性能也有一定的影响。图 10.1-25 所示的连杆锻件，因酸洗过度，在两端和沿分模面流线露头的地方已腐蚀成蜂窝状。轴承套圈或钢球在流线露头的地方也常易被腐蚀。高强度钢和铝合金锻件的横向和高向抗腐蚀能力远较纵向为低。某厂所进行的实验表明，在铝合金锻件中有穿流和涡流的地方抗腐蚀能力比纤维分布正常的地方低 1～2 级；在潮湿的环境里，当主拉应力与流线方向垂直时，某些高强度合金很容易产生应力腐蚀裂纹，这种横向和高向抗应力腐蚀能力的降低也与纤维露头有关。



图 10.1-25　沿分模面流线露头处产生严重腐蚀（箭头所指）

纤维露头的地方抗腐蚀性能下降的原因是：①此处裸露在外的大量杂质，由于与基体的电极电位不一样，容易产生电化学腐蚀；②此处原子排列很不规则，能量比较高，容易被腐蚀；③有些杂质本身的抗腐蚀性能低，容易被腐蚀。

(3) 对工艺性能的影响

纤维方向对工艺性能有很大的影响。例如，Cr12 型模具钢淬火时顺着模具流线方向伸长，横着流线方向缩短，这种材料由于热处理后的硬度很高，一般都是机加工后再热处理，因此，常常由于热处理时的变形不均造成模具报废。

板料弯曲时，当弯曲线与纤维方向一致时很容易沿杂质或化合物开裂（见图 10.1-26a），尤其当弯曲角和圆角较小时；当弯曲线与纤维方向垂直时则不易开裂（见图 10.1-26b）。因此单向弯曲时，应当使弯曲线与纤维方向垂直；双向（互成 90°）弯曲时，一般均使弯曲线与纤维方向成 45°。

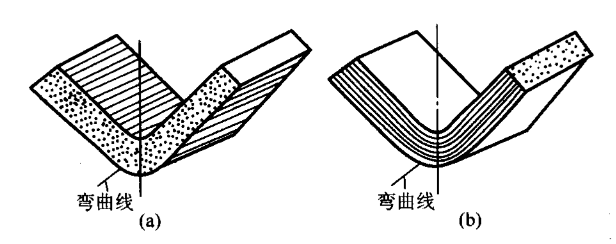


图 10.1-26　纤维方向对弯曲性能的影响

切削加工时，在流线露头的地方一般不容易获得较高的光洁度。生产中，某些要求表面光洁度很高的零件（尤其是内孔表面）常常因此而报废。

以上主要介绍了纤维方向对各种性能的影响。另外，锻件在锻压过程中所产生的流纹不顺，涡流和穿流（特别是当存在晶粒结构不均匀时）对塑性、疲劳和抗腐蚀性能影响很大，但对强度影响较小。

应当指出，材料呈现异向性的程度还与合金本身再结晶的难易程度有关，例如铜合金容易再结晶（相对于铝合金），其异向性就没有铝合金明显。

3.2　流线分布的原则和实例

流线分布的原则，应根据零件受力情况和具体破坏形式来确定。对受力比较简单的零件，如水压机立柱、叶片、曲轴、拉力轴等应尽量使流线与零件的几何外形相符合，使流线方向与最大拉应力方向一致。对形状复杂的零件，当流线与零件几何外形难于保证完全一致时，应当保证在受力较大的关键部位使流线方向与最大拉应力方向一致。例如航空零件中承受高应力部位上的金属流线，必须与主应力方向平行，不能有穿流和明显的涡流。某厂对由 30CrMnSiNiA 钢制造的承受拉力的重要结合螺栓规定：纤维方向应符合螺栓外形，切削加工时螺栓头部与杆部连接端面的机械加工余量不能超过 2 mm，以免切断螺栓头部纤维。受力比较复杂的零件，例如汽轮机和电机主轴，不仅对轴向，而且对径向和切向性能都有要求，故不希望流线的方向性太明显。

以疲劳剥落为主要破坏形式的零件，例如轴承套圈和滚珠，应尽可能使流线与工作表面相平行。

纤维方向对 Cr12 型钢冷变形模具的强度和使用寿命影响很大。例如某冷精压的压花冲头（见图 10.1-27），原先纤维方向与冲头轴线一致，工作时齿根部分受拉应力作用，常常沿纵向开裂。后来使纤维与冲头轴线垂直，使用寿命就显著提高了。

搓丝板工作时，由于被滚压的螺钉轴向伸长，在垂直于刃槽的方向受较大的变形力，常发生掉牙现象。因此用冷滚压方法加工的搓丝板，其纤维方向应与刃槽垂直以保证流线完全与齿形一致。当刃槽用磨削方法加工时，纤维方向应与刃槽平行。

冷镦模工作时切向拉应力较大，常易沿纵向开裂，故纤维沿圆周分布较好。

等轴类锻件的热锻模纤维方向应按图 10.1-28 所示的方向分布。长轴类锻件的热锻模，从防止模具的破裂出发，纤维方向应当与锻件轴线垂直（见图 10.1-29）；当磨损是影响锻模寿命的主要原因时，纤维方向应与锻件轴线方向一致。

高速钢刀具和 Cr12 型钢冲模，工作部分是刃口，常常由于碳化物分布不均而产生崩刃现象，因此，应尽可能地将碳化物打碎并均匀分布，不希望有呈带状或网状的碳化物。

对于要求抗腐蚀性能高的重要零件，最好采用无飞边模锻，以避免流线露头。

合理地布置流线可以充分地发挥材料的潜力，提高零件的性能和寿命。但这样做给锻压工艺要带来一些困难，生产率和成本也要受一定影响，因此对一般机械上的普通零件，在保证力学性能合格的条件下，对纤维分布无严格要求。

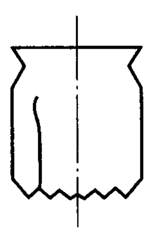


图 10.1-27　沿纵向开裂的压花冲头示意图

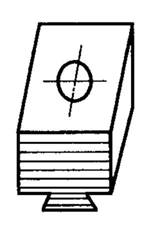


图 10.1-28　等轴类锻件锻模的纤维方向

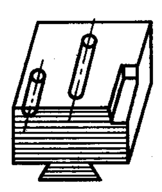


图 10.1-29　长轴类锻件锻模的纤维方向

3.3　关于流线的控制

金属流线的分布取决于锻压工具和变形工艺。对于不同的零件，应根据其形状和流线要求来选定合理的锻压工具和变形工艺。

(1) 对要求流线和外形一致的零件

1) 自由锻时尽可能采用不切断纤维的工艺，即尽量采用弯曲、扭转等工序。切肩尽量用圆角大一些的工具。如曲轴的全纤维锻造就是一个先进的工艺。

2) 模锻时应正确进行模具设计、制坯、润滑和操作。模具设计时，分模面位置、模锻工步和圆角半径等要合理选择。例如，图 10.1-30 所示的两种分模情况：图 10.1-30a 易形成折叠、穿流；而图 10.1-30b 就较合理；对工字形断面的

锻件，尤其当复板宽度与厚度之比较大时，在内圆角处易形成折叠和穿流。这时可采用较大的圆角半径，或增加预锻工步。模锻时坯料的形状、大小要适当。形状不当，坯料过大或过小均易引起流线不顺。操作时抹油过多或加压（锤击）过重也会造成流线不顺，应予以注意。

3）采用使流线能沿零件外形分布的变形方法。根据零件的不同形状和使用要求，采用合理的变形方法。例如，叶片采用挤压、辊锻或挤压加冷辊；齿轮采用精锻或轧制都能获得理想的流线分布。辊锻叶片的纤维方向与几何外形一致，与用方坯铣削的叶片相比，力学性能得到了全面提高（表 10.1-8 和表 10.1-9）。精锻和热轧的齿轮，纤维沿齿形分布，与切削加工的齿轮相比，齿根的抗弯强度提高了 30%。

压力机上锻造的和胎模锻造的轴承套圈，比平锻机上锻造的流线分布好，而用无缝钢管辗压出的沟道更好。

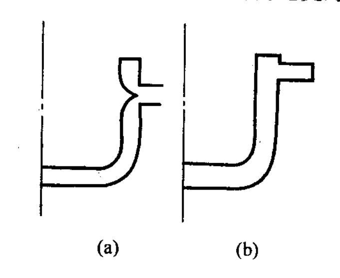


图 10.1-30 分模面位置对流线分布的影响

表 10.1-8 叶片力学性能

材料	工艺	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	ψ /%	a_K /MJ·m^{-2}	HBS
Cr17Ni13W	对用方坯加工的叶片要求	≥450	≥600	≥30	—	≥0.8	180～210
	辊锻工艺	522	692	32.5	—	1.708	185
1Cr17Ni2W2MoV	对用方坯加工的叶片要求	≥810	≥990	≥6	≥30	—	3.2～3.45
	辊锻工艺	1 073	1 198	15.72	71	—	3.27
2Cr13	对用方坯加工的叶片要求	≥500	≥700	≥16	≥50	≥0.6	217～269
	辊锻工艺	669	841	21.34	75.2	0.786	258
	辊锻工艺（10^5 kW，23 级）	795	914	16.5	57.9	0.95	250
		700	831	19.5	62.4	1.5	240

表 10.1-9 GH4033 叶片性能

工艺	持久强度			室温力学性能					
	温度 /℃	应力 /MPa	时间 /h	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ /%	ψ /%	a_K /（MJ/m^2）	HBS （$d_{10/300}$）
对用方坯加工的叶片要求	700	420	≥60	≥570	≥810	≥10	≥13	≥0.3	3.45～3.8
辊锻工艺	700	420	73（未断）	697	1 082	28	21.65	0.395	3.6

4）对受力情况复杂，不希望流线方向太明显的零件 这类零件如主轴，除要求提高材料纯洁度，以减小零件异向性外，在锻造时还应当增加一次镦粗工序。

5）对希望流线沿圆周分布的冷镦模和冷挤模 应在不变向反复镦拔后再沿纤维的横向拔长，最后再镦粗和锻成锻件。

高速钢刀具和 Cr12 型钢冲模、滚丝模，要求将碳化物打碎和均匀分布；对工作部位在圆周的插齿刀、剃齿刀、滚丝模等可采用单向镦拔；对工作部位在中心的指状铣刀，应在单向镦拔后，再沿横向拔长，最后锻成成品锻件；对冷冲模应采用三向镦拔。

4 脱碳

脱碳是钢加热时表面碳含量降低的现象。脱碳的过程就是钢中碳在高温下与氢或氧发生作用生成甲烷或一氧化碳。其化学方程式如下：

$$2Fe_3C + O_2 \rightleftharpoons 6Fe + 2CO$$

$$Fe_3C + 2H_2 \rightleftharpoons 3Fe + CH_4$$

$$Fe_3C + H_2O \rightleftharpoons 3Fe + CO + H_2$$

$$Fe_3C + CO_2 \rightleftharpoons 3Fe + 2CO$$

这些反应是可逆的，即氢、氧和二氧化碳使钢脱碳，而甲烷和一氧化碳则使钢增碳。

脱碳是扩散作用的结果，脱碳时一方面是氧向钢内扩散；另一方面钢中的碳向外扩散。从最后的结果看，脱碳层只在脱碳速度超过氧化速度时才能形成。当氧化速度很大时，可以不发生明显的脱碳现象，即脱碳层产生后铁即被氧化而成氧化皮。因此，在氧化作用相对较弱的气氛中，可以形成较深的脱碳层。

变压器硅钢片要求含碳量尽量低，除在冶炼上应加以控制外，在锻轧加热时还应利用脱碳现象，使碳含量进一步下降，从而获得容易磁化的性能。但对大多数钢来说，脱碳会使其性能变坏，故均视为缺陷。特别是高碳工具钢、轴承钢、高速钢及弹簧钢，脱碳更是一种严重的缺陷。

脱碳层的组织特征：脱碳层由于碳被氧化，反映在化学成分上其含碳量较正常组织低；反映在金相组织上其渗碳体（Fe_3C）的数量较正常组织少；反映在力学性能上其强度或硬度较正常组织低。

钢的脱碳层包括全脱碳层和部分脱碳层（过渡层）两部



分。部分脱碳层是指在全脱碳层之后到钢含碳量正常的组织处。在脱碳不严重的情况下，有时仅看到部分脱碳层而没有全脱碳层。图 10.1-31 为热轧 60Si2 钢的表面脱碳情况。

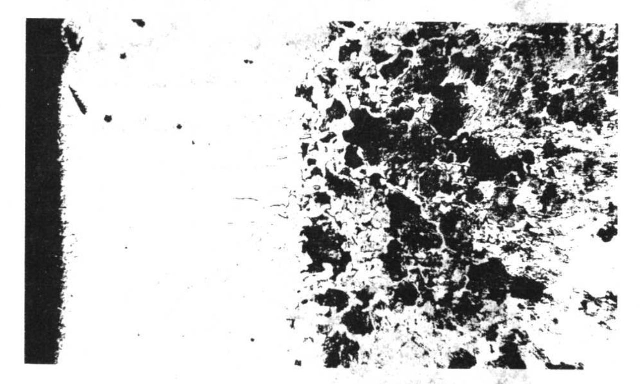


图 10.1-31　60Si2 热轧钢的脱碳层　200×

关于脱碳层深度可根据脱碳成分、组织及性能的变化，采用多种方法测定。例如逐层取样化学分析钢的含碳量，观察钢的表面到心部的金相组织变化，测定钢的表层到心部的显微硬度变化等等。实际生产中以金相法测定钢的脱碳层最为普遍。

4.1　脱碳对钢性能的影响

（1）对锻造和热处理等工艺性能的影响

1）2Cr13 不锈钢加热温度过高，保温时间过长时，能促使高温 δ 铁素体在表面过早地形成，使锻件表面的塑性大大降低，模锻时容易开裂。

2）奥氏体锰钢脱碳后，表层将得不到均匀的奥氏体组织。这不仅使冷变形时的强化达不到要求，而且影响耐磨性，还可能由于变形不均匀产生裂纹。

3）钢的表面脱碳以后，由于表层与心部的组织不同和线膨胀系数不同，因此淬火时所发生的不同组织转变及体积变化将引起很大的内应力，同时表层经脱碳后强度下降，淬火过程中有时使零件表面产生裂纹。

（2）对零件性能的影响

对于需要淬火的钢，脱碳使其表层的含碳量降低，淬火后不能发生马氏体转变，或转变不完全，结果得不到所要求的硬度。图 10.1-32 为 30CrMnSiA 钢淬火后的金相组织。

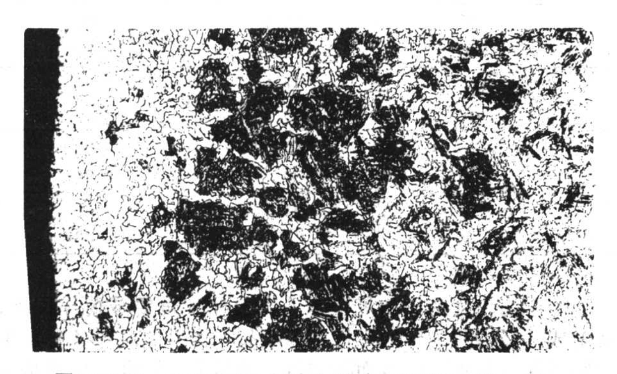


图 10.1-32　30CrMnSiA 钢表面脱碳后的淬火组织　250×

轴承钢表面脱碳后会造成淬火软点，使用时易发生接触疲劳损坏；高速工具钢表面脱碳会使红硬性下降。

由于脱碳使钢的疲劳强度降低，导致零件在使用中过早地发生疲劳损坏，图 10.1-33 所示连杆的疲劳破坏就是由于脱碳引起的。

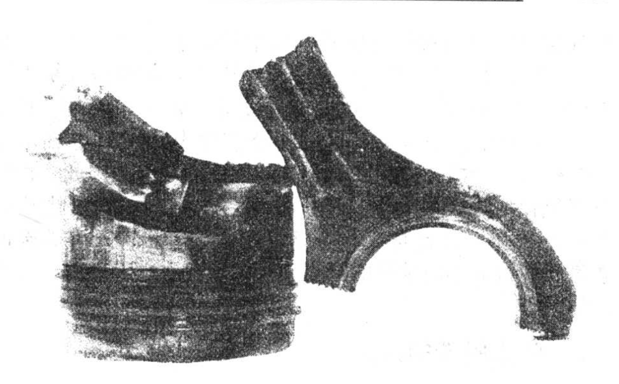


图 10.1-33　使用中断裂的连杆

零件上不加工的部分（黑皮部分）脱碳层全部保留在零件上，这将使性能下降。而零件的加工面上脱碳层的深度如在机械加工余量范围内，可以在加工时切削掉；但如超过加工余量范围，脱碳层将部分保留下来，使性能下降。有时因为锻造工艺不当，脱碳层局部堆积，机械加工时将不能完全去掉而保留在零件上，引起性能不均，严重时造成零件报废。

4.2　影响钢脱碳的因素

影响钢脱碳的因素有钢料的化学成分、加热温度、保温时间和煤气成分等。

（1）钢料的化学成分对脱碳的影响

钢料的化学成分对脱碳有很大影响。钢中含碳量愈高，脱碳倾向愈大，W、Al、Si、Co 等元素都使钢脱碳倾向增加；而 Cr、Mn 等元素能阻止钢脱碳。

（2）加热温度的影响

由图 10.1-34 可以看出，随着加热温度的提高，脱碳层的深度不断增加。一般低于 1 000℃时，钢表面的氧化皮阻碍碳的扩散，脱碳比氧化慢，但随着温度升高，一方面氧化皮形成速度增加；另一方面氧化皮下碳的扩散速度也加快，此时氧化皮失去保护能力，达到某一温度后脱碳反而比氧化快。例如 GCr15 钢在 1 100～1 200℃温度下发生强烈的脱碳现象。

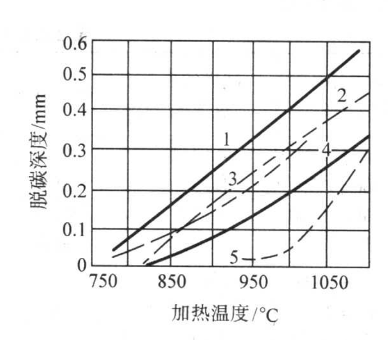


图 10.1-34　钢的脱碳层深度与化学成分和加热温度的关系
1—$w(W)=0.9\%$；2—$w(Si)=1.6\%$；3—$w(Mn)=1.0\%$
4—碳钢；5—$w(Cr)=1.5\%$

（3）保温时间和加热次数的影响

加热时间越长，加热火次愈多，脱碳层愈深，但脱碳层并不与时间成正比增加。例如高速钢的脱碳层在 1 000℃加热 0.5 h，深度达 0.41 mm，加热 4 h 达 1.0 mm，加热 12 h 后达 1.2 mm。

（4）炉内气氛对脱碳的影响

在加热过程中，由于燃料成分、燃烧条件及温度不同，使燃烧产物中含有不同的气体，因而构成不同的炉内气氛，有氧化性的也有还原性的。它们对钢的作用是不同的。氧化

性气氛引起钢的氧化与脱碳，其中脱碳能力最强的介质是H_2O（汽），其次是CO_2与O_2，最后是H_2；而有些气氛则使钢增碳，如CO和CH_4。炉内空气过剩系数α大小对脱碳也有重要的影响：当α过小时，燃烧产物中出现H_2，在潮湿的氢气内的脱碳速度随着含水量的增加而增大。因此，在煤气无氧化加热炉中加热，当炉气中含H_2O较多时，也要引起脱碳。当α过大时，由于形成的氧化皮多，阻碍着碳的扩散，故可减小脱碳层的深度。在中性介质中加热时，可使脱碳最少。

4.3　防止脱碳的措施

防止脱碳的措施主要有以下几方面。

1）工件加热时，尽可能地降低加热温度及在高温下的停留时间，合理地选择加热速度以缩短加热的总时间。

2）造成及控制适当的加热气氛，使呈现中性或采用保护性气体加热，为此可采用特殊设计的加热炉（在脱氧良好的盐浴炉中加热，要比普通箱式炉中加热的脱碳倾向为小）。

3）热压力加工过程中，如果因为一些偶然因素使生产中断，应降低炉温以待生产恢复，如停顿时间很长，则应将坯料从炉内取出或随炉降温。

4）进行冷变形时尽可能地减少中间退火的次数及降低中间退火的温度，或者用软化回火代替高温退火。进行中间退火或软化回火时，加热应在保护介质中进行。

5）高温加热时，钢的表面利用覆盖物及涂料保护以防止氧化和脱碳。

6）正确的操作及增大工件的加工余量，以使脱碳层在加工时能完全去掉。

5　白点

白点是锻件在冷却过程中产生的一种内部缺陷。在钢坯的纵向断口上呈圆形和椭圆形的银白色斑点。合金钢白点的色泽光亮，碳素钢的较暗些。白色斑点的平均直径由几毫米到几十毫米。图10.1-35为叶轮锻件纵向断面上的白点。在钢坯的横向断口上白点呈细小的裂纹（图10.1-36）。从显微组织上观察，在白点的邻近区域没有发现塑性变形的痕迹。因此，白点是纯脆性的。

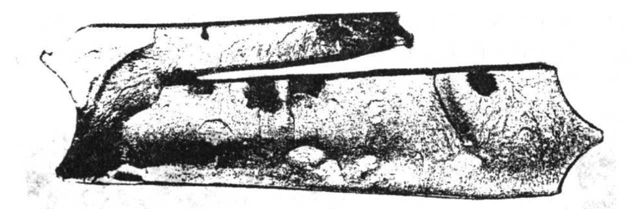


图10.1-35　34CrNi3Mo钢叶轮锻件纵断面上的白点

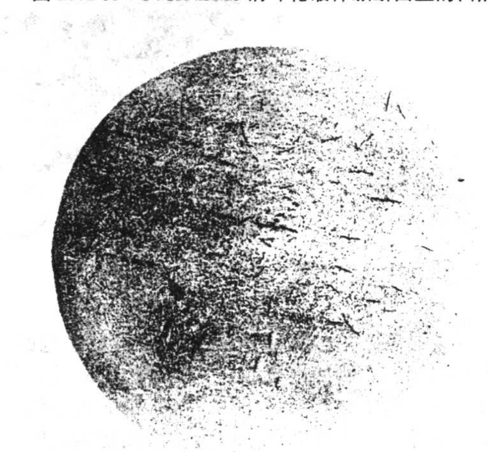


图10.1-36　横向低倍上的白点

5.1　白点对钢的力学性能的影响

白点的存在对钢的性能有极为不利的影响。它使钢的力学性能降低，热处理淬火时使零件开裂，使用时造成零件的断裂。

白点对钢力学性能的影响与取样的位置及方向有很大关系。当试样轴线与白点分布平行时，力学性能的降低有时并不明显；当试样轴线与白点分布垂直时，力学性能将显著下降，尤其是塑性指标和冲击韧度降低更为明显。表10.1-10是白点对铬、镍、钼结构钢钢坯力学性能的影响；表10.1-11是白点对22CrMnMo钢齿轮轴力学性能的影响。

表10.1-10　白点对铬镍钼钢力学性能的影响

钢的化学成分（质量分数）/%	试样的白点情况	试样方向	力学性能			
			σ_b/MPa	σ_s/MPa	ψ/%	a_K/MJ·m^{-2}
C=0.33　Mn=0.30	无白点	纵向	745	216	55.4	0.96
Si=0.20　Cr=1.79	有白点	纵向	694	206	55.6	0.82
Ni=1.87　Mo=0.30	无白点	横向	712	161	31.1	0.70
S=0.008　P=0.012	有白点	横向	446	76	19.3	0.40
C=0.32　Mn=0.31	无白点	纵向	716	226	56.0	1.02
Si=0.13　Cr=2.06	有白点	纵向	548	140	39.2	0.76
Ni=1.68　Mo=0.21	无白点	横向	700	183	51.3	0.86
S=0.013　P=0.018	有白点	横向	347	80	7.4	0.43

表10.1-11　白点对22CrMnMo钢齿轮轴力学性能的影响

试样编号	取样方向	力学性能		
		σ_b/MPa	δ/%	ψ/%
02	纵向	741	16.0	45.2
03	纵向	705	13.0	32.8
06	横向	506	1.6	
07	横向	453	0.8	5.7

由于白点处是应力集中点，在交变和重复载荷作用下，常常成为疲劳源，导致零件疲劳断裂。国外电站设备曾发生因转子和叶轮中有白点而造成的严重事故。因此，白点是一种不允许的缺陷。

近来有关资料介绍，白点不太严重的钢材，在适当的温度和应力状态条件下，当锻比足够大时，可以使白点焊合。

白点多发生在珠光体和马氏体类合金钢中，碳素钢程度较轻，奥氏体和铁素体类钢很少发现白点，莱氏体合金钢也未发现过白点。锻件尺寸愈大，白点愈易形成。因此，锻造



白点敏感性钢的大型锻件时就应特别注意，例如电站的转子和叶轮锻件等。

5.2 关于白点形成的原因

关于白点形成的理论较多。但比较有说服力而又能被实践证明的是：白点是由于钢中氢与组织应力共同作用的结果。这里的组织应力主要指奥氏体转变为马氏体和珠光体时形成的内应力。没有一定数量的氢和较显著的组织应力，白点是不能形成的。但是，若只是含氢量较高，而组织应力不大，一般也不会出现白点。例如，单相的奥氏体和铁素体类钢，因没有相变的组织应力，就极少出现白点。

氢气和组织应力是如何促使形成白点的呢？目前对这些问题的认识大致如下。①钢中含有氢时，使钢的塑性降低。当含氢量达到某数值时，塑性急剧地下降，造成氢脆现象。尤其当钢内长时间存在应力的情况下，氢可以扩散到应力集中区（间隙溶解的氢原子有集中到承受张应力的晶格中去的倾向），并使其塑性下降到几乎等于零。在应力足够大时就产生脆性破断。例如 25Cr2Ni2Mo 钢含 14.5 cm^3/100 g 的氢时，于 900℃正火，600℃回火后的伸长率降至 0.6%，断面收缩率降至 0；含 7.84 cm^3/100 g 的氢时，淬火状态的伸长率和断面收缩率均降至 0。20 钢含 170 cm^3/100 g 的氢时，退火状态的伸长率降为 0.2%，断面收缩率为 0；含 12.76 cm^3/100 g 的氢时，淬火状态的伸长率和断面收缩率均降至 0。②炼钢时钢液中吸收的氢，在钢锭凝固时因溶解度减少而析出。图 10.1-37 为氢在铁中的溶解度曲线。它来不及逸出钢锭表面而存在于钢锭内部空隙处。压力加工之前加热时，氢又溶于钢中，压力加工后的冷却过程中由于奥氏体分解和温度降低，氢在钢中溶解度减少，氢原子从固溶体中析出到钢坯内部的一些显微空隙处。氢原子在这里将结合成分子状态，并产生相当大的压力（当钢中含氢量为 0.001%，温度为 400℃时，这种压力可高达 1 200 MPa 以上）。另外，氢与钢中的碳反应形成甲烷（CH_4），也造成很大的分子压力。这一点被有的白点表面有脱碳现象所证实。③钢坯在冷却过程中因相变而造成的组织应力在一定条件下可达到相当大的数值（树枝状偏析愈严重、冷却速度愈快、淬透性愈好的钢，组织应力愈大）。因此，钢由于氢脆失去了塑性，在组织应力及氢析出所造成的内应力的共同作用下，使钢发生了脆性破裂，这就形成了白点。压力加工过程中不均匀变形引起的附加应力和冷却时的热应力对白点形成也有一定影响。

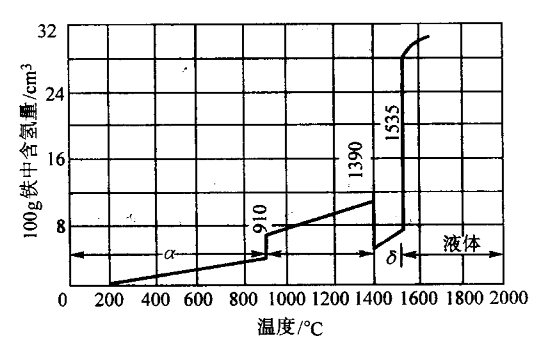


图 10.1-37 氢在铁中溶解度和温度的关系

铸钢因为内部有许多较大的空隙，氢析出时不会造成很大的内应力，因此对白点不敏感。铁素体和奥氏体类钢因冷却时无相变发生，不会有组织应力，所以一般也不出现白点。莱氏体钢冷却时虽有较大的组织应力，但可能是由于氢在这些钢中形成稳定的氢化物和由于复杂的碳化物阻碍了氢的析出等原因，也不产生白点。

白点常常是锻件冷却至室温后几小时或几十小时，甚至更长的一段时间后才产生的。例如，160 mm 的马氏体类合金结构钢方坯，冷却后 12、24、48 h 均未发现白点，直到 72 h 才发现白点。另外，白点开始产生后，在以后的继续冷却和放置期间还不断地扩大和产生新的白点。因此，检查白点应在冷却后再隔一段时间进行。

5.3 防止白点产生的措施

由于白点主要是由于钢中氢和组织应力共同作用下引起的，因此设法除氢和消除组织应力就可以避免白点的产生。其中首先应是除氢。最彻底的办法是从熔炼工艺着手，使氢在钢中的含量减少到不致引起白点的产生。严格控制炼钢操作过程，采用真空浇注等是很有效的措施。如果炼钢过程中氢含量不能控制在 2 cm^3/100 g 以下，则必须在锻后采用合理的除氢冷却规范，决不允许锻后直接空冷到室温。压力加工的钢材如果不存在白点，以后用这些钢坯锻成的锻件就不会再出现白点。因此对锻造来讲，关键问题是制定合理的锻后冷却规范。

为了消除白点，制定冷却规范的主要原则是：在尽量减小各种应力（相变组织应力、变形残余应力及冷却温度应力等）的条件下在氢扩散速度最快的温度区间，长时间保温，使氢能从钢锭中充分扩散出来。具体的措施是采用等温退火。

对马氏体类钢，在等温转变时，有两个温度范围奥氏体稳定性很小，分解速度最快。一个是 600 ~ 620℃（保温 15 h 奥氏体可分解 20%）；另一个是 280 ~ 320℃（16 min 内奥氏体可分解 95%。试验证明，在这两个奥氏体分解比较快的温度范围内，氢扩散的速度也是最快的。图 10.1-38 为氢的扩散速度与温度的关系曲线。体心立方晶格的铁素体比面心立方晶格的奥氏体可溶解的氢少。在 600 ~ 620℃长时间保温，进行等温退火时，钢的塑性较好，同时温度应力、相变应力较小，较安全，但时间要很长。在 280 ~ 320℃作等温退火，奥氏体分解快、需要的时间短，但相变应力和温度应力较大，材料塑性较低，对较大的锻件，如控制不好易出现裂纹。另外，较大截面的锻件，中心部分的氢也很难扩散出去。因此，对铬镍钼钢的大锻件，一般采用起伏的冷却规范，既能充分除氢，尽量减小应力，又能提高效率。图 10.1-39 为 34CrNiMo ϕ1 030 mm 转子锻件的冷却曲线。该曲线的主要特点是：①锻后先保温一段时间，使锻件内外温度均

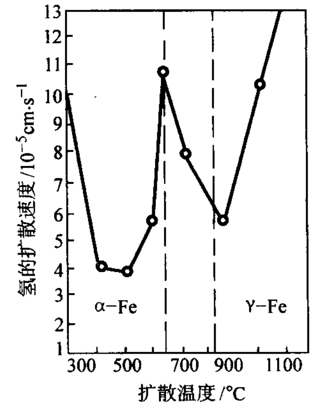


图 10.1-38 氢的扩散速度与温度的关系曲线

匀，以消除变形不均匀引起的残余应力和冷却时的温度应力。然后缓冷至略高于马氏体开始转变温度 Ms，这时奥氏体不是分解为脆性的马氏体，而是韧性较好的贝氏体，相变应力较小，在稍高于 Ms 点保持一段时间，使奥氏体充分分解，使氢充分向外扩散。但因温度低，氢气析出只在表面，

锻件中心部分仍保留较多的氢；②将锻件再加热到重结晶温度以上，并保温，使氢由含量多的心部向含量少的表面扩散，亦即使氢含量沿截面较均匀地分布；这时由于重结晶的作用使锻件的晶粒细化，为最终热处理创造较好的条件；③再次缓冷到 Ms 点以上，氢从表面扩散出去，而中心部分仍被保留着；④为使组织全部转变为索氏体，将锻件加热到600～650℃并进行充分保温，一方面使奥氏体充分分解，另一方面使中心的氢尽量向表面扩散。

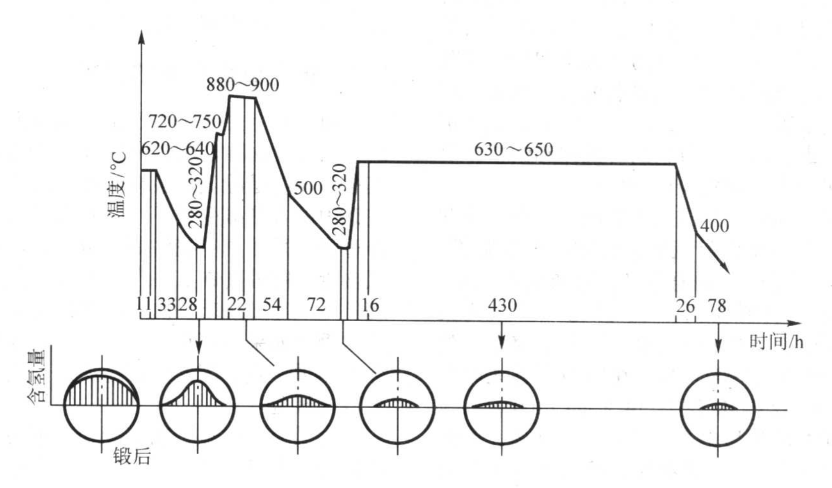


图 10.1-39　34CrNiMo 转子锻件冷却曲线

34CrNi3Mo 钢对白点很敏感，而且转子锻件截面较大，所以工艺较复杂。对其他锻件，冷却曲线应根据钢种和尺寸具体确定。

对珠光体类钢锻件，锻完后冷却到 Ac_1 以下 50～150℃，使奥氏体分解为珠光体，再加热到 Ac_1 以下 20～50℃，长时间保温（根据锻件尺寸大约几小时到十几小时，保温过程中使组织应力充分消除，并使氢逸出），然后缓慢冷却；或者锻后冷却至 Ac_1 以下 50～150℃，再加热至 Ac_3 以上 20～30℃（过共析钢为 Ac_1 以上 20～30℃）保温，再冷却至 Ac_3 以下 50～60℃长时间保温，以后缓慢冷却。在奥氏体已转变为珠光体的情况下，在靠近 Ac_1 点保温可使氢较快地逸出。

6　折叠

折叠是在金属变形流动过程中已氧化了的表层金属汇合在一起而形成的。

在零件上，折叠是一种内患。它不仅减小了零件的承载面积，而且工作时此处产生应力集中，常常成为疲劳源。因此，技术条件中规定锻件上一般不允许有折叠。

锻件经酸洗后，一般折叠用肉眼就可以观察到。用肉眼不易检查出的折叠，可以用磁粉检验或渗透检验。

锻件折叠一般具有下列特征：①折叠与其周围金属流线方向一致（图 10.1-40）；②折叠尾端一般呈小圆角（图 10.1-41）。有时，在折叠之前先有折皱，这时尾端一般呈枝叉形（或鸡爪形）（图 10.1-42 及图 10.1-43）；③折叠两侧有较重的氧化、脱碳现象（图 10.1-44）。但也有个别例外，例如，热轧齿轮时用石墨作润滑剂，由于石墨被带入折叠内并经高温扩散，在折叠两侧出现增碳现象。

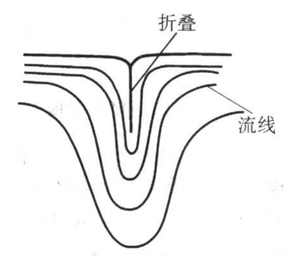


图 10.1-40　折叠与金属流线方向一致

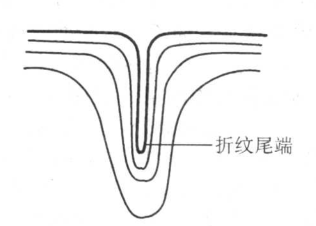


图 10.1-41　折叠尾端呈小圆角

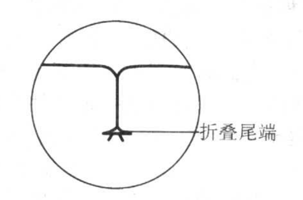


图 10.1-42　折叠尾端成枝叉形

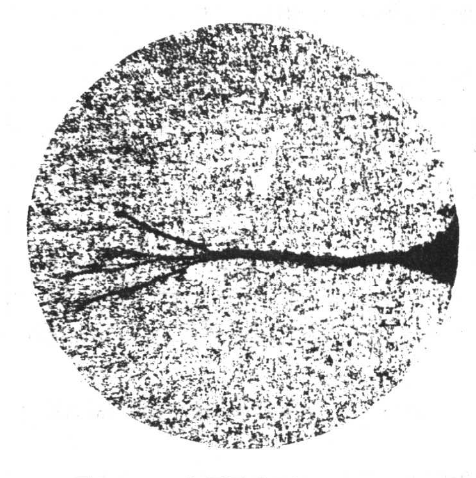


图 10.1-43　折叠尾端呈枝叉形　50×

按照上述特征可以大致地区分裂纹和折叠。但是，锻件上的折叠经进一步变形和热处理等工序之后，形态将发生某些变化，需要具体分析。例如，有折叠的零件在进行调质处理时，折叠尾端常常要扩展，后扩展的部分就是裂纹，其末



端呈尖形，其表面一般无氧化、脱碳现象（图 10.1-45）。

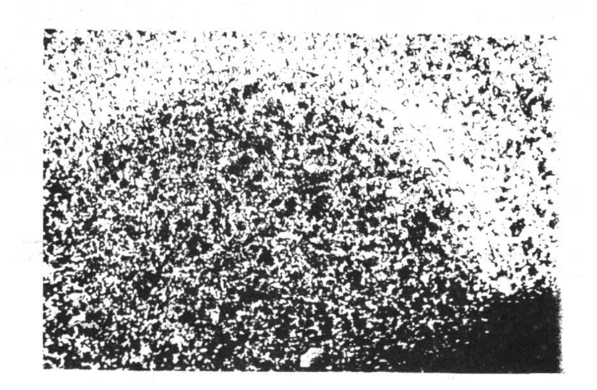


图 10.1-44 折纹两侧脱碳情况 100×

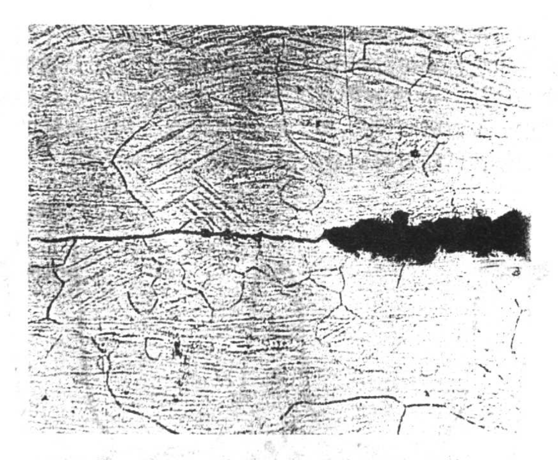


图 10.1-45 折叠尾端扩展的裂纹 400×

各种锻件，尤其是各种形状模锻件的折叠形式和位置一般是有规律的。折叠的类型和形成原因，大致有下列几种：①可能是两股（或多股）流动金属对流汇合而形成的；②可能是一股金属急速大量的流动，将邻近的表层金属带着流动而形成的；③可能是变形金属弯曲、回流并进一步发展而形成的；④也可能是一部分金属的局部变形被压入到另一部分金属内形成的。以下具体分析之。

（1）由两股（或多股）金属对流汇合而形成

这种折叠大致有以下几种。

1）模锻过程中由于某处金属充填较慢，在相邻部分均已基本充满时，此处仍缺少大量金属，形成空腔，于是相邻部分的金属便往此处汇流。

模锻时坯料尺寸不合适，操作时安放不当，打击（加压）速度过快，模具圆角、斜度不合适，或某处金属充填阻力过大等都常常会出现这种情况。

2）弯轴和带枝叉的锻件，模锻时常易由两股流动金属汇合形成折叠，如图 10.1-46、图 10.1-47 所示。

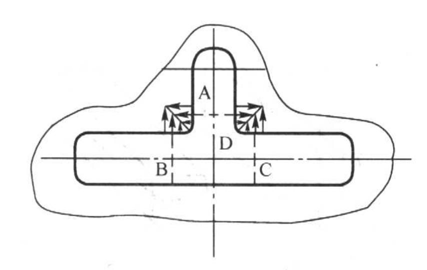


图 10.1-46 带枝叉的锻件折叠形成示意图

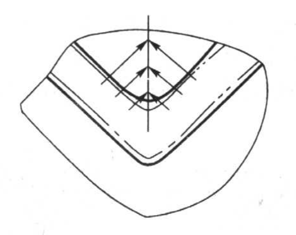


图 10.1-47 弯轴件折叠形成示意图

以图 10.1-46 的情况为例，模锻时 A 和 B（或 A 和 C）两部分的金属往外流动，已氧化过的表层金属对流汇合形成折叠。这种折叠有时深入到锻件内部，有时只分布在飞边区。

折叠的起始位置与模锻前坯料在此处的圆角半径、金属量有关。如圆角半径较大时，折叠就可能全部在飞边内，圆角半径较小时折叠就可能进入锻件内部。

折叠起始于坯料拐角的边部，但起始点的位置在模锻变形过程中是变动的，可能向模膛内部移动，也可能向飞边方向移动，这取决于坯料 D 处（图中虚线范围）金属量的多少。如果 D 部分金属量较多，模锻时有多余金属往外排出，折叠起始点向飞边方向移动。因此，为防止产生这种折叠，必须采取如下对策。

① 模锻前坯料拐角处应有较大的圆角。如采用预锻模膛，预锻模膛此处应做成较大的圆角。

② 保证此部分有足够的金属量，使模锻时折叠的起始点被挤进飞边部分。因此，应保证坯料尺寸合适，操作时将坯料放正，初击时轻一些等。

3）由于变形不均匀，两股（或多股）金属对流汇合而成折叠。

最简单的例子是拔长坯料端部时，如果送进量很小，表层金属变形大，形成端部内凹（图 10.1-48），严重时则可能发展成折叠。

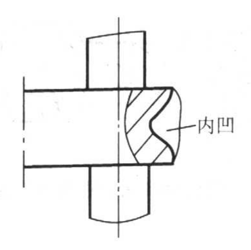


图 10.1-48 拔长时内凹形成示意图

挤压时，当挤压的坯料较高（H 较大）时，与凸模端面接触的部分金属，由于摩擦阻力很大不易变形。但当压余高度 h 较小，尤其当挤压比较大时，与凸模端面中间处接触的部分金属便被拉着离开凸模端面，并往孔口部分流动，于是在制件中产生图 10.1-49 所示的缩孔。

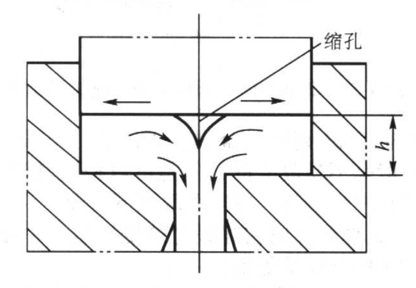


图 10.1-49 挤压时缩孔形成示意图

模锻带筋的腹板类锻件时，情况与挤压相似。当腹板较薄时常产生折叠（图 10.1-50a），腹板较厚时则不产生（图



10.1-50b)。因此，这类锻件应使腹板适当地厚一些。对腹板较薄的锻件为防止产生折叠，可预先压出一个“突起”（图 10.1-50c)，然后进行终锻（图 10.1-50d)。

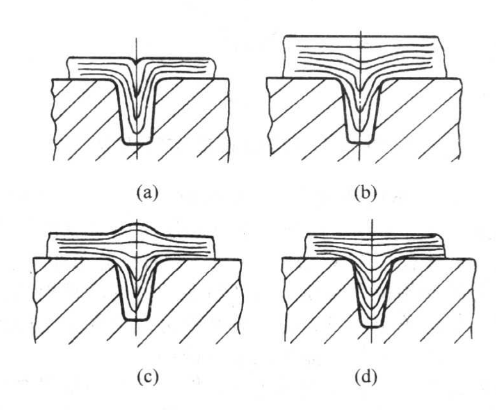


图 10.1-50　带筋的腹板类锻件模锻时折叠产生和防止办法的示意图

（2）由一股金属的急速大量流动将邻近部分的表层金属带着流动，两者汇合而形成

工字形断面的锻件、某些环形锻件和齿轮锻件，常易产生这类缺陷（图 10.1-51)。工字形锻件这种折叠（图 10.1-52）的产生原因，是由于靠近接触面 ab 附近的金属沿着水平方向较大量地外流，同时带着 ac 和 bd 附近的金属一起外流，使已氧化了的表层金属汇合一起而形成的。因此产生这种折叠有三个条件：靠近接触面 ab 附近的金属要有流动；必须沿水平方向外流；由中间部分排出的金属量较大。当 l/t 较大，筋与腹板之间的圆角半径过小，润滑剂过多和变形太快时，较易产生这种缺陷。

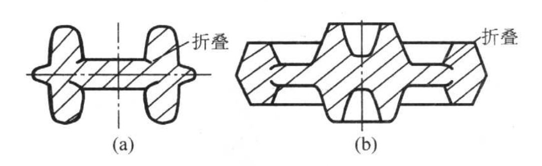


图 10.1-51　工字形断面锻件和齿轮锻件常产生的折叠部位示意图

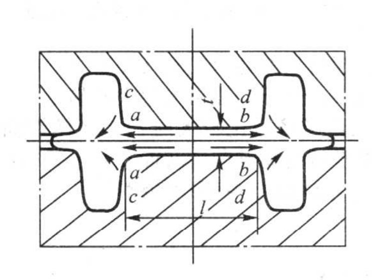


图 10.1-52　工字形断面锻件折叠形成过程示意图

靠近接触面 ab 附近的金属能否流动，与锻件尺寸直接有关，故一般是不易改变的，但是可以控制其流量和方向。因此，为防止产生折叠，应当采取如下对策：

1）使中间部分金属在终锻时的变形量小一些，即使由中间部分排出的金属量尽量少一些；

2）创造条件，使终锻时由中间部分排出的金属量尽可能向上、下型腔中流动，继续充填模腔。

环形锻件和齿轮锻件折叠形成的原因和防止对策与工字形锻件类似。带孔锻件在锤上模锻时，预锻时用斜底连皮，终锻时用带仓部的连皮，使终锻过程中内孔部分的多余金属不是流向飞边，在锻件内部形成折叠，而是流向冲孔连皮。

带孔锻件胎模锻时，一般先在坯料上冲出通孔，然后终锻。在锤上模锻时，尤其模锻铝合金锻件时，也常用这种方法。

单面带筋的件也常产生这类折叠（图 10.1-53a)，但是如果将分模的位置改变一下（图 10.1-53b)，由压入成形改为反挤成形，一般就可以避免了。

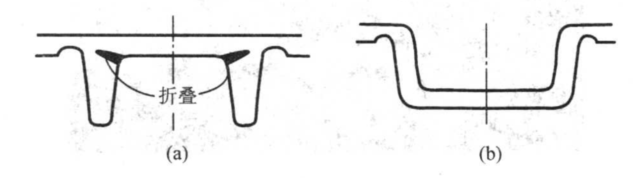


图 10.1-53　单面带筋的锻件折叠产生和防止办法的示意图

但是某些反挤成形类的锻件，如果分模面设置不当，也还会产生这种类型的折叠（见图 10.1-54 右侧)，严重时会产生穿筋，使 A 处与锻件本体分离。对已经产生了这种缺陷的锻件，可以将 A 处去掉，然后再模锻一次。最好的办法是将分模面的位置移到最上端（见图 10.1-54 左侧)。

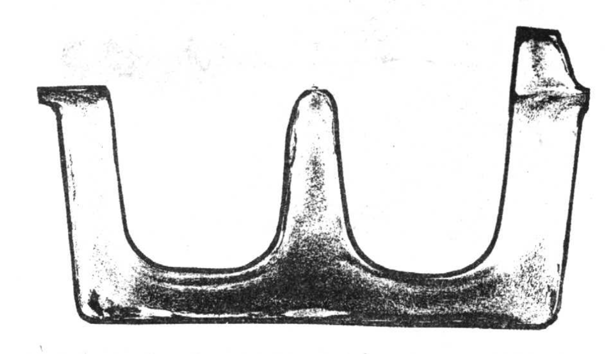


图 10.1-54　右侧分模面位置选择不当出现折纹，左侧选择合理

（3）由于变形金属发生弯曲、回流而形成

1）细长（或扁薄）锻件，先被压弯然后发展成折叠。例如细长（或扁薄）坯料的镦粗（压缩）和 $\frac{l_B}{b}>3$ 的顶镦（图 10.1-55～图 10.1-57)。

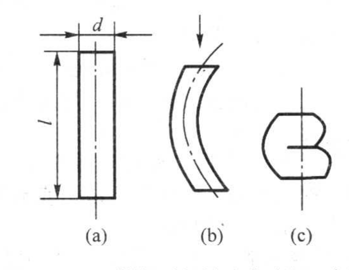


图 10.1-55　镦粗时折叠形成过程示意图

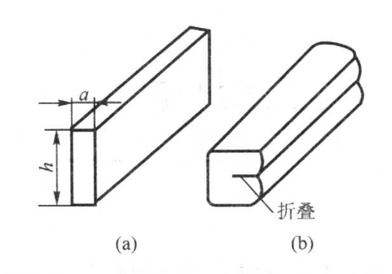


图 10.1-56　压扁时折叠形成过程示意图

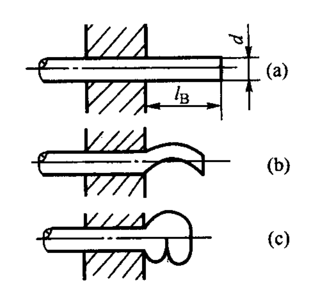


图 10.1-57　顶镦时折叠形成过程示意图

对于这类锻件，正确的锻造原则应当是：

$\frac{l}{d} \leqslant 2.5 \sim 3$　　$\frac{h}{a} < 2 \sim 2.5$　　$\frac{l_B}{d} \leqslant 2.5 \sim 2$

当$\frac{l_B}{d} > 3$时，需要在模具内顶镦。顶镦时开始会产生一些弯曲，但与模壁接触之后便不再发展，所以不致形成折叠。在模具内顶镦，关键是控制$\frac{D}{d}$值，如一次顶镦能产生折叠则可采用多次顶镦。例如，气阀$\frac{l_B}{d} \geqslant 13$，顶镦时一般需 5～6 个工步。

锤上滚压时，有时金属流到分模面上，翻转 90°再锻打时便形成折叠（图 10.1-58）。辊锻和轧制时也常产生这种类型的折叠。采取的对策是，减小每次的压下量和适当增加滚压模膛的横截面积和宽度。

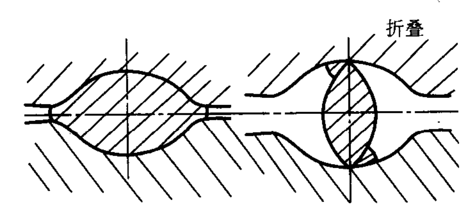


图 10.1-58　滚压时折叠形成过程示意图

2）由于金属回流形成弯曲，继续模锻时发展成折叠。以齿轮锻件为例，折叠形成的过程如图 10.1-59 所示。这种折叠的位置与图 10.1-51b 所示的不同，一般都在腹板以上（或以下）的轮缘上。

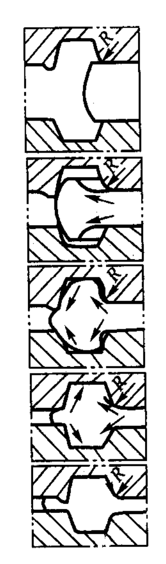


图 10.1-59　齿轮锻件折叠形成过程示意图

模锻时是否产生回流，与坯料直径、圆角尺大小和第一、二锤的打击力等有关。为防止产生这种折叠，应当使镦粗后的坯料直径 D 超过轮缘宽度的一半，最好接近于轮缘宽度的三分之二，即 $D_{坯} \approx D_1 + \frac{4}{3}b$（图 10.1-60）。圆角 R 应适当大些，模锻时第一、二锤应轻些。

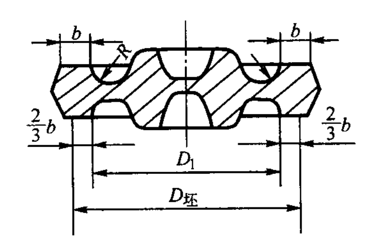


图 10.1-60　齿轮锻坯尺寸关系图

带筋的腹板类锻件有时也产生这类折叠。

(4) 部分金属局部变形，被压入另一部分金属内

这类形式的折叠在生产中是很常见的，例如拔长时，当送进量很小，压下量很大时，上、下两端金属局部变形并形成折叠（图 10.1-61）。避免产生这种折叠的对策是增大送进量，使每次送进量与单边压缩量之比大于 1～1.5，即$\frac{2l}{\Delta h} > 1 \sim 1.5$。

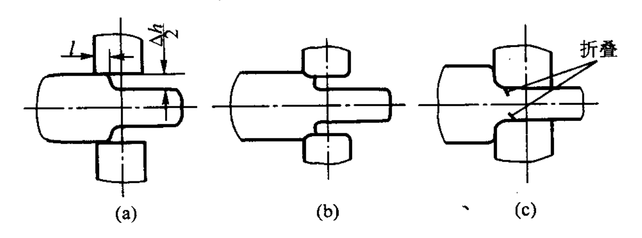


图 10.1-61　拔长时折叠形成过程示意图

模锻时，上、下模错移时在锻件上啃掉一块金属，再压入本体内便成为折叠。

另外，预锻模圆角过大，而终锻模相应处圆角过小，终锻时也会在圆角处啃下一块金属并压入锻件内形成折叠（图 10.1-62）。故一般取 $R_{预} = 1.2R_{终} + 3$。模锻铝合金锻件时，如果因为圆角的缘故，一次预锻不行时，则可采用两次预锻。

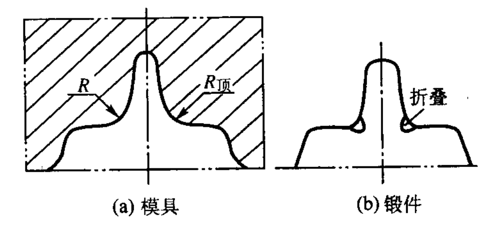


图 10.1-62　预锻模圆角过大终锻时形成折叠的示意图

斜轧和横轧时，如果乱牙也将产生这类折叠。

实际生产中折叠的形式是多种多样的，但其类型和形成原因大致不外乎以上几种。掌握和正确运用这些规律，便可以在实践中避免产生折叠。同时，按照这些道理，也可以解决锻件中流线的合理分布。

7　裂纹

裂纹是塑性加工中常见的主要缺陷之一。不仅在塑性成形过程中能产生裂纹，而且在成形前（下料、加热）及成形后（冷却、切边、校正）都有可能产生裂纹。在不同工序中

产生裂纹的具体原因及相应的裂纹形态也是不同的，但总是先形成微观裂纹，然后发展扩大成宏观裂纹。本节介绍塑性加工中裂纹的一般情况，对各种裂纹的具体分析将在各有关章节中介绍。

塑性加工过程（包括加热和冷却）中裂纹的产生与受力情况、变形金属的组织结构、变形温度及变形速度等有关。塑性加工过程中除了工具给予工件的作用力之外，还有由于变形不均匀和变形速度不均匀引起的附加应力，由温度不均匀引起的热应力和由组织转变不同时进行而产生的组织应力。

应力状态、变形速度、变形温度是裂纹产生和扩展的外部条件，金属的组织结构是裂纹产生和扩展的内部依据。前者是通过对金属组织及对微观机制的影响而对裂纹的发生和扩展发生作用的。全面分析裂纹的成因应当综合地进行力学和组织分析。分别介绍如下。

7.1 形成裂纹的力学分析

在外力作用下物体内各点处于一定的应力状态，在不同的方位将作用不同的正应力及切应力。材料力学已经证明，即使在简单的压缩条件下也有剪应力，即使在纯剪的情况下也有拉应力及压应力，而且最大拉应力与剪应力相等，只要在三应力不等的情况下，总是有一最大剪应力存在。也就是说，通常正应力及切应力是同时存在的，而且从塑性变形的机理来看，无论是滑移还是孪晶都是需要有足够的剪应力。现实材料的断裂形式一般只有两种：一种是切断，断裂面平行于最大切应力或最大切应变方向；另一种是正断，断裂面垂直于最大正应力或最大正应变方向。

至于材料将采取何种破坏形式，主要取决于应力系统，即正应力 σ 与剪应力 τ 之比，也与材料所能承受的极限变形程度 $\varepsilon_{最大}$ 最大及 $\gamma_{最大}$ 有关，见表 10.1-12。例如，对于高塑性材料的扭转，由于最大切应力与正应力之比 $\frac{\sigma}{\tau}=1$，是剪断破坏；对于低塑性材料由于不能承受大的拉应变，扭转时则沿 45°方向开裂。由于断面形状突然变化或试件上有尖锐缺口，将引起应力集中，应力的比值 $\frac{\sigma}{\tau}$ 有很大变化。例如，带缺口的试件拉伸时 $\frac{\sigma}{\tau}=4$，这时多发生正断。

表 10.1-12 不同负荷类型下正断和切断的宏观形貌

负荷类型		变形方式		断裂方式	
		$+\varepsilon_{最大}$	$\gamma_{最大}$	正断	切断
拉伸					
压缩					
剪切					
扭转					
弯曲					

下面分析不同外力引起开裂的情况。

(1) 由外力直接引起的裂纹

塑性加工中常见的由外力直接引起工件开裂的情况有：

1) 弯曲时工件外侧的拉裂；
2) 冲头扩孔和楔扩孔时工件侧表面的拉裂；
3) 拉拔和拉深时工件传力区的拉裂；
4) 胀形时工件的拉裂；
5) 曲面零件拉深时的拉裂；
6) 低塑性材料镦粗和拔长时的剪裂；
7) 扭转时的剪裂和拉裂；
8) 剪切时的剪裂和拉裂等。

如前所述，高塑性材料扭转时产生剪裂，低塑性材料产生拉裂。

剪切时，如间隙合适，仅产生剪裂，间隙较大时则先剪裂后拉裂，精密剪切时仅产生剪裂。

(2) 由附加应力引起的裂纹

附加应力主要是由两种原因引起的。①变形不均匀；②变形时流速不均匀。分别介绍如下。

1) 由变形不均引起的裂纹　塑性加工中由于变形不均引起附加应力而导致工件开裂的情况是非常多的。例如，一般材料镦粗时侧表面产生的纵向裂纹，是由于表面受切向拉应力作用的结果，而这切向拉应力就是由于镦粗时变形不均匀引起的附加应力（见第 3 章图 10.3-1）。再如拔长时的中心横向裂纹、表面裂纹和角裂，冲孔时工件侧表面上的裂纹，轧制和辊锻过程中的裂纹等均属此种情况。

圆截面坯料在平砧上拔长时的中心纵向裂纹，横轧和楔横轧时的中心裂纹和空腔是由作用力和附加应力共同作用产生的。

2) 由流速不均匀引起的裂纹　挤压棒材时，由于受模口摩擦阻力影响，表层金属流动得慢，中心金属流动得快，外表层受拉，中部金属受压，在表层易引起横裂（图 10.1-63）。



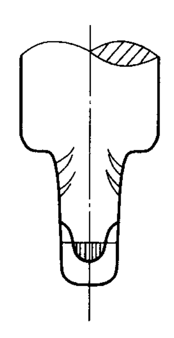


图 10.1-63　棒料挤压时的附加应力分布情况和横向裂纹

空心件挤压（包括正挤和反挤）时前端的纵向裂纹也是由于流速不均匀引起的（见第 3 章图 10.3-52）。

（3）由温度应力及组织应力引起的裂纹

当加热或冷却时由于温度不均匀造成热膨胀或冷缩不均匀引起的内应力，总的规律是在降温较快（或加热较慢）处受拉应力，在降温较慢或升温较快处受压应力。

当组织转变不同时发生时，则易产生组织应力。总的规律是每一瞬间进行增加比容的转变区受压应力，进行减少比容的转变区受拉应力。奥氏体冷却时有马氏体转变的材料，冷却过程形成的温度应力及组织应力的分布情况如图 10.1-64 所示（图中应力都是指轴向应力）。

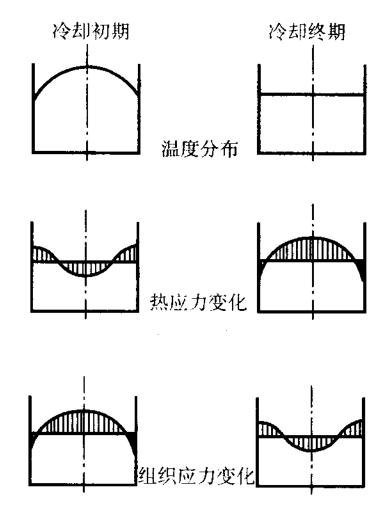


图 10.1-64　冷却过程中的温度应力和组织应力分布情况

冷却初期工件表层温度较心部明显降低，表层的收缩趋势受到心部的阻碍，在表层产生拉应力，在心部产生与其平衡的压应力，随着冷却过程的进行，这种趋势进一步发展。但由于心部温度高，塑性较好，还可产生微量塑性变形，以缓和这种热应力。到了冷却后期，表层温度已接近常温，基本上不再收缩，而心部温度尚高，仍继续收缩，导致了热应力的反向，即心部由压应力转为拉应力，而表层则由拉应力转为压应力。这种应力状态保持下来构成材料的残余应力。

组织的变化是在一定的温度区间内完成的。当工件表层冷却至马氏体转变温度时产生体积膨胀，但由于心部仍然处于奥氏体状态，对表层的体积膨胀起牵制作用，因此表层这时受压应力。随着冷却过程的进行，这种趋势进一步发展。但随着心部发生马氏体转变，由于该处的体积膨胀而引起应力的松弛。当工件继续冷却，由于心部形成的马氏体含量愈来愈多，体积膨胀也越来越大，而表层体积已不再变化，这时心部的伸长趋势受到表层的阻止作用，结果导致组织应力的反向，心部转为压应力，表层则为拉应力。这种应力状态一直保持下来构成残余应力。

由以上所述可以看出，工件在冷却过程中所形成的热应力及组织应力在不断变化，其分布方向恰好相反，但从数量上并不能正好抵消；热应力早在高温冷却初期即产生，而淬火组织应力则在较低的温度（Ms 以下）时才开始出现；冷至室温后的最终残余内应力，其大小与分布情况取决于热应力与组织应力在每一瞬时相互叠加作用的结果。

对于无同素异构转变的锻件，在锻后空冷或其他缓慢的冷却过程中，热应力通常并不引起严重后果。虽然冷却初期温差较大，表层为拉应力（中心部分受压应力），但因温度较高，塑性较好，不致引起开裂；冷却后期温差不太大，且表层受压应力，所以也不引起开裂。奥氏体（如 1Cr18Ni9Ti、50Mn18Cr4WN）的任何大断面断件都可以直接空冷而不需缓冷，甚至水淬时也不产生裂纹。

组织应力在较低温度下才开始发生，这时材料塑性较低，这是造成冷却时开裂的主要原因。高速钢冷却裂纹及马氏体不锈钢冷却裂纹附近没有氧化脱碳现象也证明了这一点。对于马氏体不锈钢，即使采取一些缓冷措施，仍必须退火后才能进行酸洗，否则在腐蚀时易出现应力腐蚀开裂。

加热时温度分布及其变化情况与冷却时正相反，升温过程中表层温度超过心部温度，并且导热性越差，断面越大，温差也越大。

对于热应力，这时表层受压内层受拉，在受拉应力区由于温度低，塑性差有可能形成开裂。在加热初期金属尚处于弹性状态的时候，在加热速度不变的条件下，根据计算，在圆柱体坯料轴心区沿轴向的拉应力是沿径向和切向拉应力值的两倍。因此，加热时坯料一般是横向开裂。

加热过程中由于相变不同时进行也有组织应力发生，但这时由于温度较高，材料塑性较好，其危险程度远较冷锭快速加热时为小。

7.2　形成裂纹的组织分析

对裂纹的成因进行组织分析，有助于了解形成裂纹的内在原因，也是进行裂纹鉴别的客观依据。

从大量的锻压件裂纹实例分析和重复试验中可以观察到，塑性成形过程中的裂纹主要有下列两种情况。

（1）组织和性能比较均匀的材料

塑性成形过程中，首先在应力最大，先满足塑性条件的地方发生塑性变形。在形变过程中位错沿滑移面运动，遇着障碍物，便会堆塞，并产生足够大的应力而产生裂纹；或由于位错的交互作用形成空穴、微裂，并进一步发展成宏观的裂纹。这主要产生在变形温度较低（低于再结晶温度）或变形程度过大、变形速度过快的情况。这种裂纹常常是穿晶或穿晶和沿晶混合的。而在高温时，由于原子具有较高的扩散速度，有利于位错的攀移，加速了恢复和再结晶，使变形过程中已经产生的微裂纹比较容易修复，因此，在变形温度适宜，变形速度较慢的情况下，可以不发展为宏观的裂纹。

（2）组织和性能不均匀的材料

组织和性能不均匀的材料，热变形时裂纹通常在晶界和某些相界面发生。这是因为热变形通常在金属的等强温度以上进行的。晶界的变形较大，而金属的晶界往往是冶金缺陷、第二相和非金属夹杂比较集中的地方。在高温下某些材料晶界上的低熔点物质发生熔化，严重降低材料的塑性，同时在高温下周围介质中的某些元素（硫、铜等）沿晶界向金属内扩散，引起晶界上第二相的非正常出现和晶界的弱化，另外，基体金属与某些相的界面由于两相在力学性能和理化性能上的差异结合力较弱。

锻造所用的原材料通常是不均匀的。因此，热变形时裂

纹主要沿晶界或相界面发生和扩展。

7.3 锻造裂纹的鉴别与防止产生裂纹的原则措施

(1) 锻造裂纹的鉴别

鉴别裂纹形成的原因，应首先了解工艺过程，以便找出裂纹形成的客观条件，其次应当观察裂纹本身的状态；然后再进行必要的有针对性的显微组织分析、微区成分分析。举例如下。

对于产生龟裂的锻件，粗略的分析可能是：①由于过烧；②由于易熔金属渗入基体金属（如铜渗入钢中）；③应力腐蚀裂纹；④锻件表面严重脱碳。这可以从工艺过程调查和组织分析中进一步判别。例如，在加热铜以后加热钢料或两者混合加热时，则有可能是铜脆。从显微组织上看，铜脆开裂在晶界上，除了能找到裂纹外，还能找到亮的铜网，而在单纯过烧的晶界上只能找到氧化物。应力腐蚀开裂是在酸洗后出现，在高倍观察时，裂纹扩展呈树枝状态。锻件严重脱碳时，在试片上可以观察到一层较厚的脱碳层。

裂纹与折叠的鉴别，不仅可以从受力及变形的条件考察，也可以从低倍和高倍组织来区分。一般裂纹与流线成一定夹角，而折叠附近的流线与折叠方向平行，而对于中、高碳钢来说折叠表面有氧化脱碳现象。折叠的尾部一般呈圆角，而裂纹通常是尖的。

具有裂纹的锻件经加热后，裂纹附近有严重的氧化、脱碳，冷却裂纹却无此现象。

由缩管残余引起的裂纹通常是粗大而不规则的。

由于冷校正及冷切边引起的裂纹，在裂纹的周围有滑移带等冷变形痕迹。

(2) 防止裂纹产生的原则措施

由前面的分析可以看出：裂纹的产生与受力情况和材料的塑性有关。塑性是材料的一种状态，它不仅取决于变形物体的组织结构，而且取决于变形的外部条件（包括应力状态、变形温度和变形速度等）。应力状态的影响在有些文献中用静水压力来衡量，当温度和应变速度一定时，由拉应力引起的开裂的条件为：

$$C_\sigma \approx a - bp + c\varepsilon$$

由切应力引起的条件为：

$$C_\tau \approx A - Bp + C\varepsilon$$

上两式中，p 为静水压力，即三个主应力的平均值，拉为正，压为负；ε 为等效应变，代表加工硬化，a、b、c 及 A、B、C 为系数。

三向等压应力不仅不会使裂纹扩展，而且变形体中存在微小的未被氧化的裂纹，在高的三向压应力作用下也是可以锻合的。对于低塑性材料采用反推力挤压及带套镦粗都是用增加静水压力的数值来防止开裂，挤压和拔长时减少附加拉应力，是防止开裂的非常有效的措施（例如静液挤压）。

变形温度对材料的塑性有很大影响。温度低，冷变形硬化严重，塑性下降，温度过高也易过热与过烧。镁合金等密排六方晶格在常温下仅有一组滑移面（即基面），当温度超过 200℃以后才增加新的滑移面。因此，应当保证在变形过程中能够充分地进行再结晶，并尽可能在单相状态下变形。

应变速度对于低塑性材料有很大影响，应根据具体材料选用合适的锻造设备。例如 MB5 镁合金在锤上热锻易裂，而在水压机上用同样温度锻压则不产生裂纹。根本原因是镁合金再结晶过程进行缓慢，高速下变形易开裂。MA3（相当 MB5）合金在压力机上变形时再结晶温度为 350℃，而在冲击载荷下需要在 600℃变形才能获得完全的再结晶组织。

冷变形程度过大时往往易引起开裂，需要中间退火，消除硬化和变形所引起的部分缺陷。热变形时通常由于再结晶过程能顺利进行等原因，使变形所引起的缺陷部分地得到消除，因而使塑性有所提高。

为提高材料的塑性，从组织上应避免晶界上出现低熔点物质和脆性化合物。

高温均匀化可以改善组织的不均匀性，提高材料的塑性。

8 空腔

横轧、斜轧和楔横轧时，如果工艺参数控制不当，常易在坯料轴心区产生裂纹和空腔。空腔的形成将使所轧的零件报废，因而是不希望的。本节主要介绍空腔形成的机理和避免形成空腔的主要途径。

空腔形成的机理与圆截面坯料在平砧上拔长时中心裂纹产生的原因类似，关于中心裂纹产生的原因将在第 3 章第 2 节具体介绍。但为了分析空腔形成的机理，这里先作概要介绍。

圆截面坯料在平砧上拔长时，中心裂纹是由于作用力和附加应力共同作用引起的。外力作用的情况，如第 3 章图 10.3-21 所示。外力通过困难变形区传给坯料的其他部分。在坯料的中心部分受到径向拉应力 σ_R 的作用。由于沿加载方向受力面积逐渐扩大，该方向应力的绝对值 $|\sigma_3|$ 逐渐减小，变形主要集中在上、下部分，轴心部分变形很小，见图 10.3-22。因而变形金属主要沿横向流动，并对轴心部分金属作用以附加拉应力。

附加拉应力和 σ_R 的方向是一致的，愈靠近轴心部分受到的拉应力愈大，当拉应力的数值大于金属当时的强度极限时，金属就开始产生纵向裂纹和破坏。另外圆截面坯料在平砧上拔长时，一边锻打，一边旋转坯料，这样的操作情况使轴心区晶粒的晶界还受到剪切应力的反复作用，更促使该处产生破坏。

图 10.1-65 是晶粒界面的应力变化示意图。图中 A、B 为两个处于轴心位置的晶粒。mn 为其界面。当两个晶粒处在图中 1 的位置时，在垂直方向晶界 mn 承受压应力，横向受拉应力，当处在位置 2 时，界面 mn 与外力成 45°方向，沿界面受最大切应力作用，两晶粒产生相对滑动，并且横向还受拉应力作用；当处于位置 3 时，界面 mn 受横向拉应力作用；当处于位置 4 时，沿界面 mn 受最大切应力作用，两晶粒产生相对滑动，但相对滑动的方向与位置 2 时相反，此时横向仍受拉应力作用。随着拔长过程中的锻打和旋转，坯料径向受拉应力作用，并在切应力作用下，轴心区的晶粒界面产生反复的相对滑动，因此，轴心区的晶界很易破坏，形成微裂纹，当微裂纹得不到及时修复时，便发展成大的裂缝。

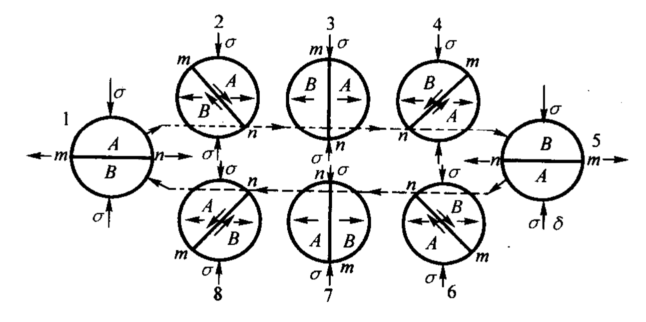


图 10.1-65 晶粒界面应力变化示意图

横轧、斜轧和楔横轧时的受力情况比圆截面坯料拔长时更复杂，更容易形成裂纹和空腔。

以横轧为例（图 10.1-66），坯料除垂直方向受压力作用外，切向还受摩擦力作用。该摩擦力形成一个力矩，在坯料



内部引起剪切变形。因此坯料轴心部位，除垂直方向受压应力作用、横向受拉应力作用外，还受切应力的作用。该切应力引起晶粒间的相对滑动和转动，产生较大的晶间剪切变形。图 10.1-67a 是一般压缩时晶粒的变形情况，图 10.1-67b 是有切应力作用时的变形情况。可以看出，后一种情况晶界相对位移较大。

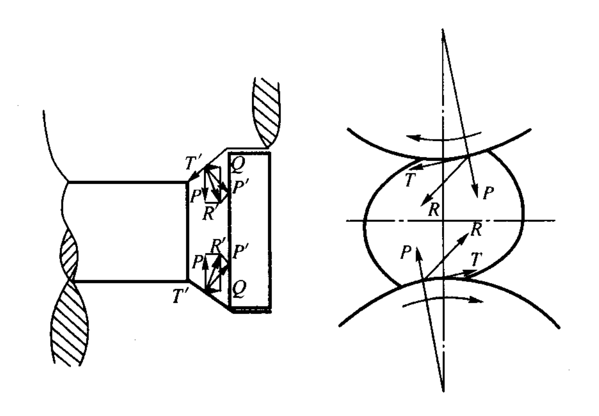


图 10.1-66　孔型横轧轧件作用力图

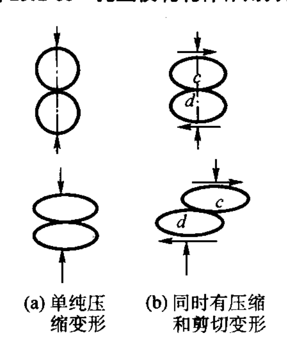


图 10.1-67　晶界相对切移示意图

图 10.1-68 是晶界相对转动的示意图。图 a 为变形前的情况，图 b 为变形后的情况，由图中可见，C、D 两晶粒原来相触的 C、D 两点，变形后彼此分开了。相邻晶粒产生了相对转动，沿晶界产生了较大的剪切变形。

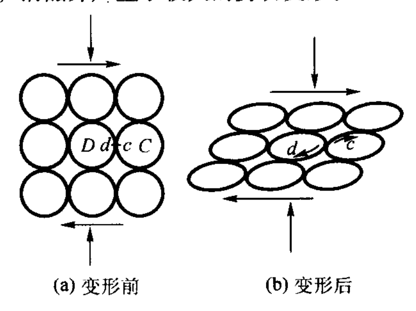


图 10.1-68　晶界相对转动示意图

由以上分析可见，横轧、斜轧和楔横轧时除了具有与圆截面坯料在平砧上拔长时相同的受力情况外，还受一个摩擦力矩的作用，它产生较大的晶间剪切变形，从而加速了晶界的破坏，因此更容易形成裂纹和空腔。

圆截面坯料在平砧上拔长时，送进量愈大，由于金属沿轴向流动困难，沿横向的流动更为剧烈，更易于产生中心裂纹。横轧、斜轧和楔横轧也一样，沿坯料轴向的变形区愈长，愈易产生空腔。变形温度对空腔的产生亦有较大影响。变形温度较高时，轴心部位最初产生的微裂纹，通过压实焊合和再结晶等可以得到修复。变形温度过低时，由于微裂纹得不到及时修复，将发展成宏观的裂纹。

塑性加工中，在坯料内部形成这种中心裂纹和空腔的现象一般是不希望的。但是在生产无缝钢管时，可以利用它在钢棒内形成空腔，再轧制成钢管。这也就是轧制钢管时的空腔形成原理。

避免横轧和楔横轧时形成空腔的主要途径是减小变形区金属在横截面内的流动量，增加轴向流动的分量。主要措施是增大轴向拉应力的数值和减小变形区的轴向相对长度（具体措施见第 3 章第 8 节）。另外，控制好适宜的变形温度。

9　压缩失稳

塑性加工中压缩失稳的主要表现是坯料的弯曲和起皱。本节介绍压缩失稳的机理和避免失稳的主要途径。

压缩失稳在弹性和塑性变形范围内都可能发生。在弹性状态时，当压力 P 达到某值 P_K 时，压杆（板条）就产生失稳而弯曲（图 10.1-69），使压杆以曲线形状保持平衡，该状态的压力 P_K 称为临界压力。这时杆内产生一内力矩与外力矩平衡，即内力矩 = 外力矩。平衡状态下的微分方程为：

$$EI\frac{d^2y}{dx^2} = -Py \tag{10.1-1}$$

式中，E 为材料的弹性模数；I 为压杆的惯性矩，对于宽为 b 厚为 t 的平板，$I=\frac{bt^3}{12}$。

将式（10.1-1）积分并整理后得到如下的欧拉公式：

$$P_K = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \tag{10.1-2}$$

当坯料内部的压应力超过屈服极限时，材料进入塑性状态，式（10.1-2）就不再适用了。这时需要进一步讨论在塑性范围内的压缩失稳问题。假如所研究材料的应力 - 应变关系如图 10.1-70a 所示，而且在临界压力下在材料内引起的压应力 σ_K 位于曲线的 a 点。因为弯曲后受压的内侧压应力继续增加即沿 ad 线加载至 b 点，而受拉的外侧，由于弯曲引起的拉应力使外侧材料沿 ae 线卸载至 c 点（见图 10.1-70a）。此时材料截面内的应力分布如图 10.1-70b 所示。材料受拉的外侧的边沿应力增量为 $\Delta\sigma_1$，受压的内侧的边沿上的应力增量为 $\Delta\sigma_2$，可分别表示为：

$$\Delta\sigma_1 = E\frac{t_1}{\rho} \tag{10.1-3}$$

$$\Delta\sigma_2 = F\frac{t_2}{\rho} \tag{10.1-4}$$

式中符号参见图 10.1-70a。

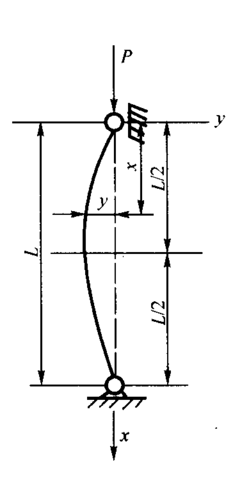


图 10.1-69　压杆的受力和变形



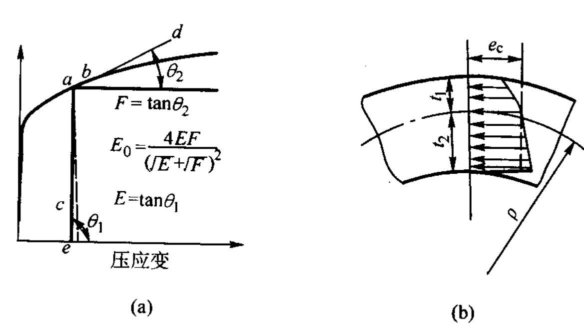


图 10.1-70 临界压力下坯料截面内的应力分布情况

根据失稳压缩条件，轴向压力的增量 $dP=0$（即在临界力 P_K 作用下压杆以曲线形状保持平衡），可以得到内力矩

$$M=\frac{I}{\rho}\frac{4EF}{(\sqrt{E}+\sqrt{F})^2} \quad (10.1\text{-}5)$$

将 $E_0=\frac{4EF}{(\sqrt{E}+\sqrt{F})^2}$，$\frac{1}{\rho}=\frac{d^2y}{dx^2}$代入式（10.1-5）得：

$$M=E_0 I\frac{d^2y}{dx^2} \quad (10.1\text{-}6)$$

根据内力矩与外力矩相等的平衡条件得临界状态下的微分方程式：

$$E_0 I\frac{d^2y}{dx^2}=-P_K y \quad (10.1\text{-}7)$$

积分式（10.1-7）并整理后得：

$$P_K=\frac{\pi^2 E_0 I}{L^2} \quad (10.1\text{-}8)$$

可以看出式（10.1-8）与式（10.1-2）形式完全相同，只是塑性失稳的临界压力公式中用 E_0 代替了弹性失稳临界压力公式中的 E 值。E_0 为折减弹性模数，也称相当弹性模数。它反应了弹性模数 E 和硬化模数 F 的综合效果。研究表明，塑性失稳时实际的临界压力比式（10.1-8）得到的还要低，失稳在压力达到 P_K 前就发生了，为了安全和简便，多采用下式求临界力

$$P_K=\frac{\pi^2 FI}{L^2} \quad (10.1\text{-}9)$$

式中，F 为硬化模数（在研究压缩失稳时又称作切线模数）。

由图 10.1-70a 可知 $F<E_0<E$，而且坯料塑性变形越大时，E_0 和 F 越小，抵抗压缩失稳的能力越差。

对于直径为 d 的圆截面杆 $I=\frac{\pi d^4}{32}$，代入式（10.1-9）得：

临界压力 $$P_K=\frac{\pi d^2}{4}\times\frac{\pi^2 F}{8}\left(\frac{d}{L}\right)^2 \quad (10.1\text{-}10)$$

临界压应力 $$\sigma_K=\frac{\pi^2 F}{8}\left(\frac{d}{L}\right)^2 \quad (10.1\text{-}11)$$

对于宽为 b，厚为 t 的矩形板条 $I=\frac{bt^3}{12}$，代入式（10.1-9）得：

临界压力 $$P_K=bt\times\frac{\pi^2 F}{12}\left(\frac{t}{L}\right)^2 \quad (10.1\text{-}12)$$

临界压应力 $$\sigma_K=\frac{\pi^2 F}{12}\left(\frac{t}{L}\right)^2 \quad (10.1\text{-}13)$$

由得到的塑性压缩失稳的临界压力和临界压应力的式（10.1-8）~式（10.1-13）可以看出，材料的抗压缩失稳除与材料的刚度性能参数 E_0、F 有关外，还与受载的压杆（或板条）的几何参数（$\frac{t}{L}$、$\frac{d}{L}$）有着更密切的关系。当相对厚度$\frac{t}{L}$越小，相对高度$\frac{L}{d}$越大，即板料越薄、杆件越细时越易发生失稳。板料的压缩失稳往往表现为失稳起皱，而杆件的压缩失稳往往表现为失稳弯曲。

实际生产中，细长杆件在受压缩时，其失稳弯曲影响坯料的极限尺寸比例和成形极限。因此为避免失稳弯曲，圆柱体坯料压缩时其相对高度$\frac{L}{d}$一般应小于 2.5 ~ 3，扁方坯料压缩时其高度与宽度比（$\frac{h}{b}$）一般应小于 3.5 ~ 4。失稳弯曲还影响一些工序的极限变形程度（成形极限）。

对于板料成形，失稳起皱除影响成形件的质量和成形极限外，也还直接影响一些成形工序能否顺利进行。因此，压缩失稳对板料的成形影响尤为突出。

防止细长杆和薄板压缩失稳的主要途径是在其弯曲的方向施加一个反向的作用力，限制其继续发展。例如板料拉深时为防治法兰起皱而施加的压边力。

编写：吕炎（哈尔滨工业大学）



第2章 各类金属材料塑性成形件的常见缺陷与控制措施

本章将分别介绍莱氏体高合金工具钢、不锈钢、高温合金、铝合金、镁合金、铜合金和钛合金等七类金属材料塑形成形件质量的一些共性问题。对每一类金属材料，在概要介绍其锻造工艺特点的基础上，着重分析了锻造过程中的主要缺陷、缺陷产生的原因和控制措施。

结构钢（包括碳素结构钢和合金结构钢）在生产中应用最广泛。与高合金工具钢、耐热不锈钢和高温合金相比，结构钢的工艺塑性好，变形抗力小，导热性好，变形温度范围宽。但是，由于结构钢的冶炼方法较多、钢锭的尺寸较大、浇铸后冷却速度慢，偏析严重。因此，该类钢的钢锭和钢材中存在有较多的冶金缺陷，如残余缩孔、枝晶偏析、气泡、疏松、夹杂等。这些缺陷可能在锻件内产生遗传性的影响。

结构钢在加热和冷却过程中有同素异构转变，锻件的使用性能主要靠最终热处理工艺来保证。另外，锻造过程中的某些缺陷也可以用锻后热处理（如正火、退火等）予以消除或改善。

结构钢锻件锻造过程中的质量问题大致如下。

加热过程中的主要缺陷是氧化、脱碳、过热、过烧。锻件过热后在低倍上表现为粗晶。多数合金结构钢锻件过热后沿原高温奥氏体晶界有析出相，并常常呈现稳定过热。马氏体钢和贝氏体钢锻件过热后，由于组织遗传的原因，常产生低倍粗晶。结构钢过热后的断口，按过热的程度和检验状态不同有粗晶断口、萘状断口和石状断口等。

结构钢一般都具有较好的塑性，锻造过程中的开裂主要是下列因素引起的：①钢锭和钢材中的冶金缺陷；②加热过程中由于渗硫、渗铜、渗锡等原因，在晶界上存在有低熔点相；③锻造操作不当。

锻造变形工艺不当时，可能引起折叠、流线分布不符合要求等缺陷。终锻温度偏低时，可能在锻件内引起带状组织。

结构钢在冷却过程中由于有相变，能引起组织应力。结构钢大锻件，当含氢量较高，且锻后冷却工艺不当时，常易产生白点。

结构钢锻件在锻造过程中常产生的上述缺陷，由于第1章中已有论述，故本章不再介绍，对于工具钢，本章也只介绍其中质量问题较多的莱氏体高合金工具钢。

1 莱氏体高合金工具钢塑性成形件的常见缺陷与控制措施

莱氏体高合金工具钢包括高速钢和Cr12型模具钢等。

高速钢是用于制造高速切削的刃具。这类刃具除要求高硬度、高耐磨性以外，还要求高热硬性，即在高速切削条件下刀刃不会因发热而软化的性能。这类钢在适当淬火、回火热处理后的硬度一般高于63HRC，高的可达68~70HRC，并且在600℃左右仍然保持63~65HRC的高硬度。Cr12型模具钢用于制造重负荷、高精度、高寿命的冷变形模具。例如，冷冲模、冷镦模、滚丝模、冷轧辊等。这类模具要求具有高强度、高硬度、高耐磨性以及足够的韧性。这类钢淬火、回火后的硬度为62~64HRC。

我国常用的莱氏体高合金工具钢的牌号和成分见表10.2-1和10.2-2。

表10.2-1 高速钢的化学成分

钢号	化学成分（质量分数）/%												
	C	W	Mo	Cr	V	Co	Si	Mn	Nb	Al	S	P	XL加入量
W18Cr4V	0.70~0.80	17.50~19.00	≤0.30	3.80~4.40	1.00~1.40		≤0.40	≤0.40			≤0.030	≤0.030	
9W18Cr4V	0.90~1.00	17.50~19.00	≤0.30	3.80~4.40	1.00~1.40		≤0.40	≤0.40			≤0.030	≤0.030	
W12Cr4V4Mo	1.20~1.40	11.50~13.00	0.90~1.20	3.80~4.40	3.80~4.40		≤0.40	≤0.40			≤0.030	≤0.030	
W14Cr4VMnXL	0.80~0.90	13.50~15.00	≤0.30	3.50~4.00	1.40~1.70		≤0.50	0.35~0.55			≤0.030	≤0.030	0.07
W6Mo5Cr4V2	0.80~0.90	5.50~6.75	4.50~5.50	3.80~4.40	1.75~2.20		≤0.40	≤0.40			≤0.030	≤0.030	
W6Mo5Cr4V2Al	1.05~1.20	5.50~6.75	4.50~5.50	3.80~4.40	1.75~2.20		≤0.60	≤0.40		0.80~1.20	≤0.030	≤0.030	
W6Mo5Cr4V5SiNbAl	1.55~1.65	5.50~6.50	5.10~6.00	3.80~4.40	4.20~5.20		1.00~1.40	≤0.40	0.20~0.50	0.30~0.70	≤0.030	≤0.030	
W10Mo4Cr4V3Al	1.30~1.45	9.00~10.50	3.50~4.50	3.80~4.50	2.70~3.20		≤0.50	≤0.50		0.70~1.20	≤0.030	≤0.030	
W12Mo3Cr4V3Co5Si	1.20~1.30	11.50~13.50	2.80~3.40	3.80~4.40	2.80~3.40	4.70~5.10	0.80~1.20	≤0.40			≤0.030	≤0.030	

注：1. 为改善钢的组织性能，允许在钢中加入适量的稀土元素，但须在证明书中注明。

2. 在钨系高速工具钢中，钼含量允许到1.0%。钨、钼二者的关系：当钼含量超过0.3%时，钨含量相应减少，在钼含量超过0.3%的部分每1%的钼代替2%的钨。在这种情况下，在钢号后面加上“Mo”。

由表中可见在莱氏体高合金钢中加入了大量的 W、Cr、Mo、V 等合金元素，有的还含有多量的 Co。下面以高速钢为例，介绍合金元素在钢中的作用。

钢中的 W、V 和 C 形成复合碳化物，在淬火加热时，一部分碳化物溶于奥氏体中，淬火后，又过饱和地溶入 α-Fe 中形成合金马氏体。由于 W、V 和 C 原子的结合力很大，提高了合金马氏体受热分解的稳定性。要使马氏体分解、并使其分解生成的复合碳化物聚集，需要较高的温度（600～650℃）。同时，另一部分过剩的 W、V 碳化物在高温加热时也能有效地阻止晶粒长大，因此，高速钢能在相当高的温度下保持较高的硬度。

表 10.2-2 莱氏体高合金模具钢的化学成分

钢号	化学成分（质量分数）/%						
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	W
Cr12	2.0～2.3	≤0.35	≤0.4	11.5～13.0	—	—	—
Cr12W	2.0～2.3	≤0.35	≤0.4	11.0～12.5	—	—	0.6～0.9
Cr12MoV	1.45～1.7	≤0.35	≤0.4	11.0～12.5	0.4～0.6	0.15～0.3	—
3Cr2W8V	0.30～0.40	0.2～0.4	≤0.35	2.2～2.7	—	0.2～0.5	7.5～9

钢中碳化物的分布状况对莱氏体高合金工具钢的使用性能影响极大。只有当碳化物呈小颗粒并均匀分布时，该类钢的良好使用性能才能充分地表现出来。如果碳化物呈大块或网状分布，则刃具和模具工作时常在碳化物堆积处发生崩刃或折断。当刃口部分碳化物很少时，极易磨损和变形。另外，当碳化物呈带状分布时，使横向塑性和韧性降低，这对在重载下工作的模具影响很大，使许多模具在工作时常常沿碳化物带开裂。表 10.2-3 是不同碳化物偏析级别对高速钢插齿刀使用寿命的影响。不同碳化物偏析级别的 Cr12 型钢的冷冲模，使用寿命可相差 10～20 倍或更大。

表 10.2-3 不同碳化物偏析级别对高速钢插齿刀使用寿命的影响

碳化物偏析级别	100 min 磨损量/mm	碳化物偏析级别	100 min 磨损量/mm	碳化物偏析级别	100 min 磨损量/mm
3～4	0.05	5～6	0.06	7～8	0.08

该类钢的大块或网状碳化物是在铸锭结晶过程中形成的。以高速钢为例，由于 W 和 Cr 等合金元素对临界点的影响，在 1 330～1 300℃之间形成鱼骨状的莱氏体共晶组织（见图 10.2-1），并呈网络状包围着先前生成的 γ 固溶体。另外，在 1 300～900℃之间还会析出二次网状碳化物。高速钢的这种铸造组织，尤其是一次网状共晶碳化物，用热处理办法不能改善，只有用锻造的办法将其击碎并使其均匀分布。

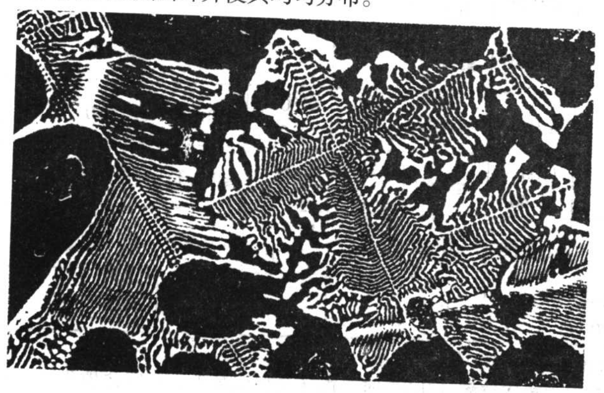


图 10.2-1 W18Cr4V 钢的莱氏体共晶碳化物 500×

锻造时，变形程度大小直接影响莱氏体钢锻件内碳化物的细化程度和均匀分布。图 10.2-2 为碳化物偏析级别随锻比变化的曲线。该曲线表明，锻造比小于 16 时，随着锻造比的增大，碳化物偏析级别迅速降低；当锻造比增大到 16～20 时，随着锻造比的增加，降低碳化物偏析级别的效果较差。当锻造比超过 20 时，再增大锻造比，效果就很小了。

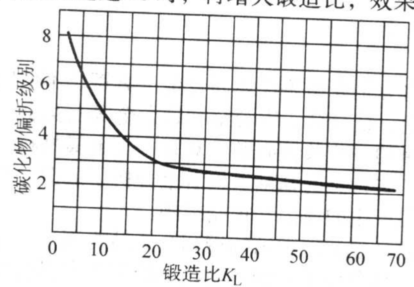


图 10.2-2 碳化物偏析级别随锻造比变化的曲线

高速钢原材料的碳化物偏析级别符合国标 GB/T 9943—1988 规定。而对于高速钢锻件，国内尚无统一标准，一般分为八级。对 Cr12 型钢按 GB/T 1299—2000 并参照高速钢评级。

与结构钢相比，该类钢的锻造工艺特点主要是：

1）塑性低　该类钢中由于存在有大量的一次碳化物（共晶碳化物），因而塑性很低，尤其当碳化物呈大块或网状分布时，锻造时很易开裂；

2）变形抗力大　该类钢由于存在大量的合金元素和再结晶温度高，所以变形抗力比碳钢大 2～3 倍；

3）导热性差　该类钢的低温热导率比碳钢低数倍；

4）冷却过程中的组织应力大。

下面分析锻造过程中常见的缺陷和控制措施。

（1）碳化物颗粒粗大，分布不均匀

碳化物分布不均匀，呈大块状集中分布或呈网状分布。产生的原因是原材料碳化物偏析级别差，加之改锻时锻造比不够或锻造方法不当。具有这种缺陷的锻件，热处理淬火时容易局部过热和淬裂，制成的刃具和模具使用时易崩刃等。

如前所述，碳化物愈细，分布愈均匀，刃具的使用性能愈好。这就要求锻造时变形量很大。但是，高速钢塑性很差，若变形量大，则容易锻裂。因此，不能盲目追求过低的偏析级别，而只要保证工作部位的碳化物分布合乎要求就可以了。对于不同的工件应根据具体情况（包括原材料情况）确定合适的锻造方法和锻造比。

锻造莱氏体高合金工具钢时常采用以下几种锻造方法。

1）单向镦粗　这种方法适用于简单薄饼形零件，当原材料的碳化物分布不均匀程度较好，且锻件的要求较接近时采用。采用这种锻造方法时，为使碳化物得到进一步击碎，镦粗比应不小于 3。即

$$\frac{H}{h} \geqslant 3$$

式中，H 为原坯料的高度；h 为锻件的高度。

2）单向拔长　对于长度与直径比较大的工件，当原材料的碳化物不均匀分布程度较好且和锻件的要求接近时，多采用单向拔长法。一般来说锻造比愈大，碳化物被破碎愈细，分布愈均匀；但过大的锻造比容易形成碳化物带状组织，影响横向力学性能。单向拔长时一般取锻造比为 2～4 较为合理。

3）轴向反复镦拔　轴向反复镦拔（见图 10.2-3）即在镦拔过程中金属始终沿着坯料的轴线方向流动。这种锻造方法的优点是：①坯料中心部分（一般是碳化物的高偏析区）的



金属，不会流到外层来，保证表层金属的碳化物分布比较细小均匀；②锻造时不需改变方向，操作较易掌握。其缺点是：①中心部分的碳化物偏析情况改善不大；②由于坯料轴心部分质量差和两端面长时间与锤头、下砧接触，冷却快，拔长时端面易产生裂纹。

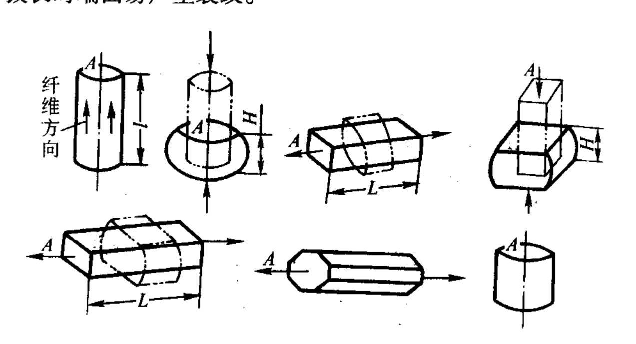


图 10.2-3　轴向反复镦拔二次变形过程示意图

H—镦粗后高度；*A*—材料纤维方向；*l*—毛坯长度；*L*—锻件长度

对于工作部位在毛坯圆周表面的刀具和模具，例如，插齿刀、剃齿刀和滚丝模等，采用这种方法较为简单、可靠，它能保证工件在切削部位具有良好的金属组织和力学性能。

4) 轴向－径向（十字、双十字）反复锻造　十字镦拔（见图 10.2-4）是将原毛坯镦粗后，沿横截面中两个互相垂直的方向反复镦拔，最后再沿轴向锻成锻件。如重复这一过程就叫双十字锻造。这种方法的优点是：坯料与锤头的接触面经常改变，温度不会降低太多，径向锻造时坯料的端部质量较好，故可减少端面裂纹的产生，有利于击碎坯料中心部分的碳化物。对于工作部位在中心的一些工具或模具（例如冷冲模等），可以采用这种方法。但是这种方法由于变形时中心金属外流，如外流金属不能受到均匀的大变形，则在靠近 1/4 直径处碳化物级别可能降低不大。而且周围表面上还可能出现碳化物级别不均匀的现象。另外，在操作上要求技术较熟练，故对于刃口分布在圆周表面的刀具不宜采用这种方法。

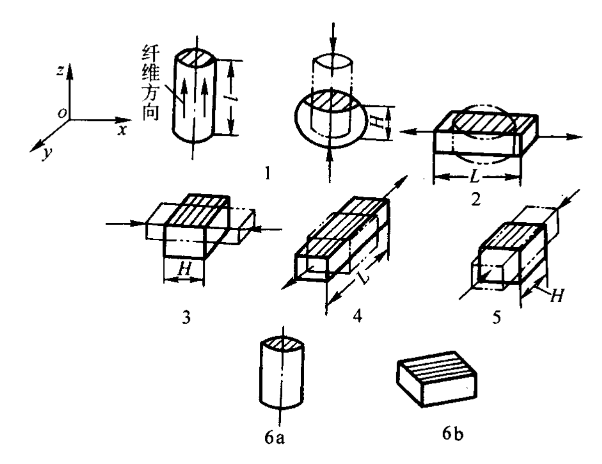


图 10.2-4　轴向－径向十字锻造变形过程示意图

l—毛坯长度；*H*—镦粗后高度；*L*—拔长后长度

5) 综合锻造法　综合锻造法（见图 10.2-5）是在径向十字镦拔后，转角 45°进行倒角，然后再进行轴向拔长和镦粗。

这种锻造方法保留了径向十字镦拔坯料中心不容易开裂和轴向镦拔容易改善碳化物级别等优点，又借助于倒角锻造使锻件周围表面的碳化物级别比较均匀。这种方法的缺点是：工艺复杂，需要较熟练的操作技术，严格掌握材料的纤维方向，倒角时不安全，且易产生裂纹。

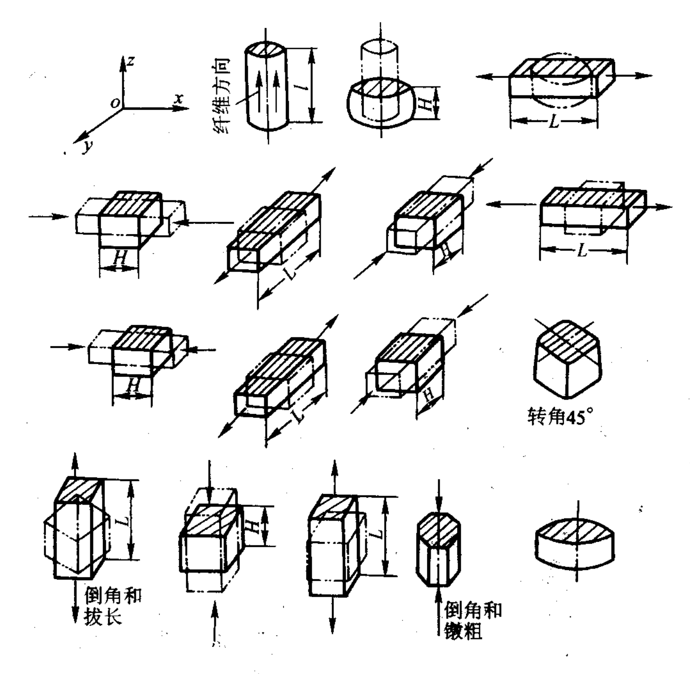


图 10.2-5　综合锻造法变形过程示意图

l—毛坯长度；*H*—镦粗后高度；*L*—拔长后长度

综合锻造法适用于工作部位在毛坯圆周表面的工具和原材料中心质量较差的情况，大批生产时不宜采用这种方法。

另外，在锻造 Cr12 型钢模具时也常用三向镦拔的方法。

综上所述，为保证刃具和模具工作部位的碳化物细化，防止莱氏体高合金工具钢在锻造过程中产生碳化物颗粒粗大，分布不均匀等缺陷，应采用合适的锻造方法，并保证有足够大的锻造比。

如前所述，锻造时的变形程度，直接影响高速钢锻件内

部碳化物的细化程度和均匀分布。反复镦拔时，由于工序尺寸的比例大体一致，因此，改锻时的变形程度（总锻造比）常常习惯地用镦拔次数来表示。在制定锻造工艺时，应根据锻件的工作部位、技术要求和原材料碳化物不均匀度级别来确定镦拔次数。这可参考表 10.2-4 进行选用。

表 10.2-4 镦粗 – 拔长次数

原材料碳化物不均匀度等级 \ 对锻件碳化物不均匀度的等级要求	3	4	5	6
4	4～3			
5	6～5	4～3		
6		6～5	3～2	
7		7～6	5～4	2～2

1）表 10.2-4 适用于每次镦拔时锻造比 $y=2$ 的情况，如果 $y<2$ 时，镦拔次数应适当地增加，如果 $y>2$ 时，镦拔次数可适当减少。一些工厂的实践说明，增大每次镦拔的锻造比对改善碳化物的不均匀性较显著，但操作困难些（主要是容易镦弯）。

2）工具工作部位深度越大（即越靠近锻件中心），则镦拔次数应多些。

3）在其他条件相同的情况下，碳化物不均匀性改善的程度与锻件最后一次变形工序有关。如最后为变形程度较大的拔长或镦粗，不均匀性改善较显著；如最后为变形程度不大的镦粗，则不均匀性的改善不甚显著。

以插齿刀为例，按一般标准，插齿刀的碳化物偏析级别要求≤3 级。当原材料碳化物偏析级别为 5 级时，镦拔次数取 6～5 次；原材料为 4 级时，镦拔次数取 4～3 次。例如，$\phi80\times170$坯料碳化物级别 5 级，经 6～5 次镦拔后，碳化物为 3 级（图 10.2-6），符合要求。某厂曾用 $\phi100\times109$ 的坯料，碳化物偏析为 7～8 级，锻造时只镦拔一次，在锻件中保留大块碳化物（图 10.2-7）。这样的插齿刀在淬火时常出现过热、过烧和回火不足等现象（见图 10.2-8），并且残留的奥氏体很多，直接影响刀具使用寿命和尺寸精度。当碳化物带较宽时，淬火时常易沿带的方向开裂（图 10.2-9）。这样的刀具切削时常常发生崩裂（图 10.2-10）。

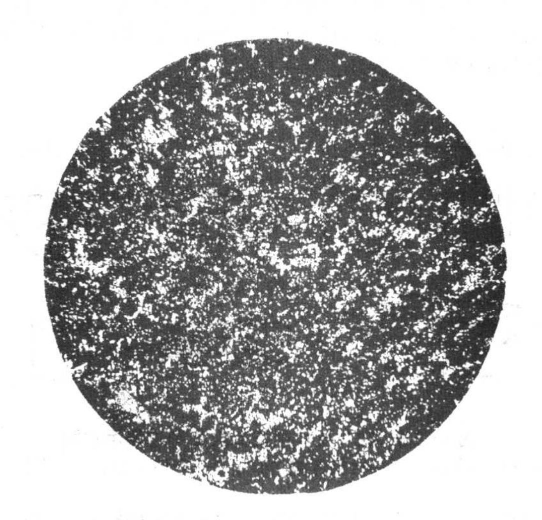


图 10.2-6 W18Cr4V 钢经 5～6 次镦拔后的碳化物 100×

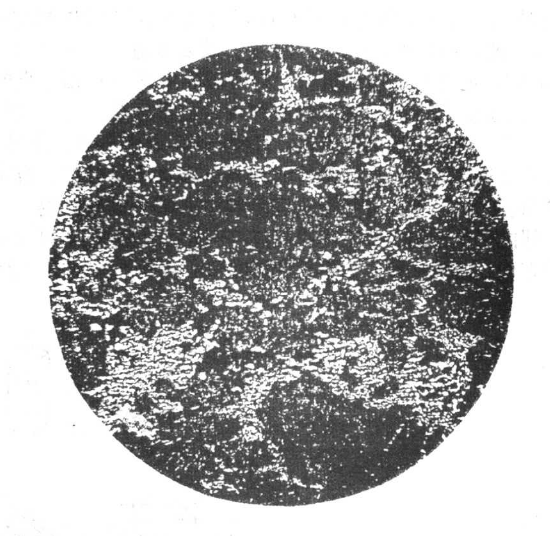
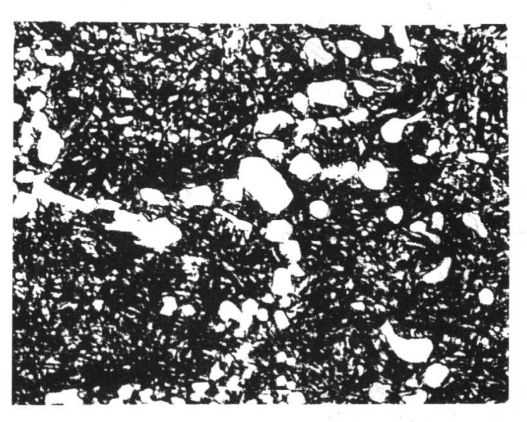
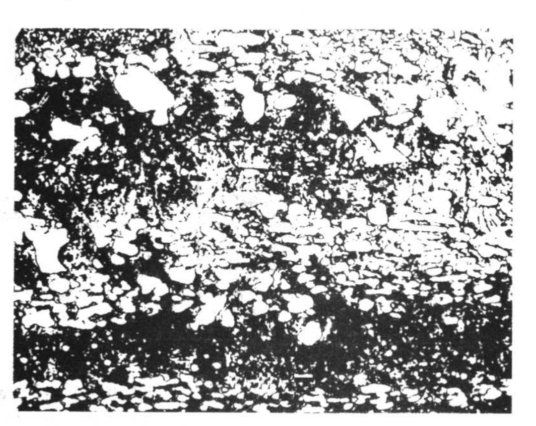


图 10.2-7 W18Cr4V 钢经一次镦拔后的碳化物 100×



(a) 过热



(b) 回火不足

图 10.2-8 W18Cr4V 钢插齿刀热处理时的过热和回火不足组织 500×



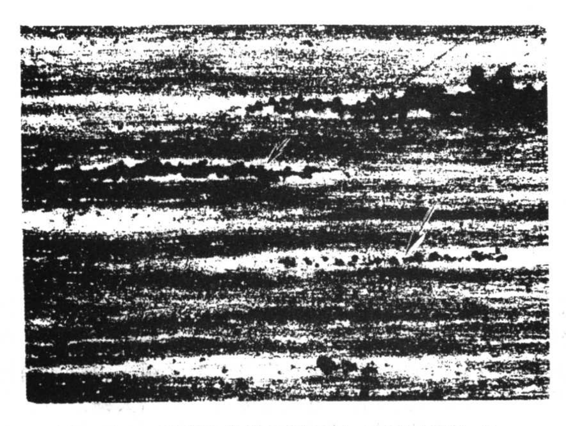


图 10.2-9　沿碳化物偏析带淬裂（箭头所指）40×

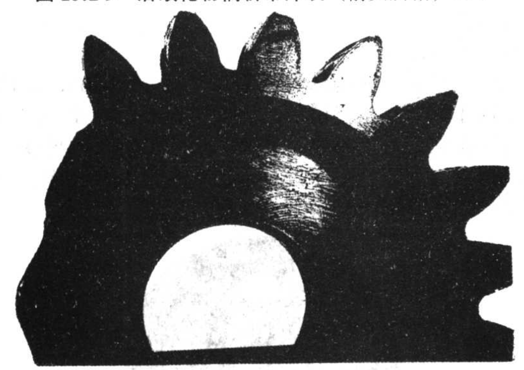


图 10.2-10　W18Cr4V 插齿刀切削时崩裂

为了得到细小颗粒和均匀分布的碳化物。除需选定合适的镦拔次数外，还应注意下列几点：

1）适当降低最高热加工温度，尽量减少锻造火次。因为加热温度高、高温停留时间长和加热次数多，均会促使一次碳化物颗粒长大。

2）在 900～1 050℃范围内重击成形。因为此时奥氏体基体较硬，对破碎一次碳化物较有效。

3）选用足够能量的设备。因为莱氏体工具钢的变形抗力比碳钢大 2～3 倍，如果设备能量过小，则变形仅限于锻件表面，内部碳化物将得不到破碎。

（2）过热、过烧

莱氏体高合金工具钢加热时很容易过热、过烧。高速钢在 1 300℃，Cr12 型钢在 1 155℃时，共晶组织就开始熔化了。过烧时晶粒很粗大，晶界发生局部熔化，氧化性气体侵入晶界并使其氧化，结果使钢的强度和塑性大大降低，锻造时一打就碎（见图 10.2-11）。过烧的钢断口粗糙，类似豆腐渣状，显微组织中出现莱氏体（图 10.1-16）。该类钢过烧后，晶粒粗大，晶界上一次碳化物角状化（见图 10.1-13），材料的工艺塑性下降。

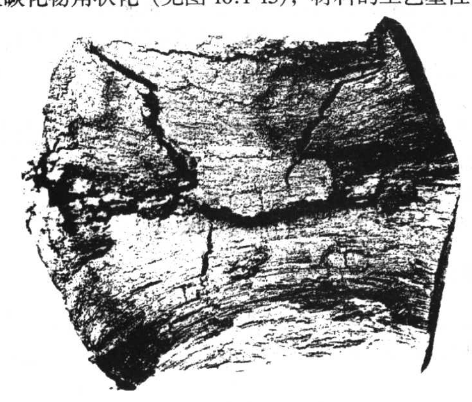


图 10.2-11　W18Cr4V 过烧引起的锻裂

由于钢在结晶时严重区域偏析，铸锭和轧材的表面和中心的化学成分有相当大的差异，中心部位的含碳量、合金元素含量及夹杂都比较多，而表面较少。因此，钢材表面和中心的结晶终了温度（也就是熔化温度）是不同的。对于 W18Cr4V 高速钢来说，表面部分的始熔温度约高于 1 350℃，中心部分约低于 1 300℃，中心部分碳化物的偏析等级愈高，熔化温度愈低。因此，当锻造加热温度高于 1 200℃，比如 1 230℃或者 1 250℃时，中心部位已接近熔化温度，特别是在一次碳化物边缘的高碳高合金元素含量部位或者低熔点杂质的部位，奥氏体强度很低，在锻打时易开裂。因此，为避免过热过烧，莱氏体高合金工具钢的加热温度应低于始熔温度，例如，W18Cr4V 高速钢的加热温度应不超过 1 200℃，最好是 ≤1 180℃。钨-钼系高速钢的加热温度还应低些。Cr12 型钢应不超过 1 100℃。另外，加热和保温时间也不宜过长。一般预热时间 1 min/mm。高温加热时间 0.5 min/mm。

（3）裂纹

裂纹是莱氏体高合金工具钢锻件最常见的一种缺陷。加热、变形、操作和锻后冷却不当等均可能产生裂纹。

锻造变形过程中常发生的锻裂形式有：对角线裂纹、侧表面裂纹、角裂和内裂等（图 10.2-12、图 10.2-13）。

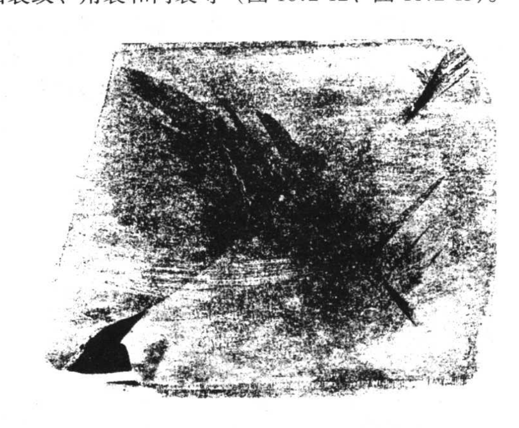


图 10.2-12　W18Cr4V 钢在 750 kg 空气锤上轴向反复镦拔后形成的十字裂纹



图 10.2-13　W18Cr4V 钢在 750 kg 空气锤上滚圆时形成的中心轴向裂纹

对角线裂纹和中心裂纹在莱氏体高合金工具钢拔长时常易产生，尤其是采用轴向反复镦拔工艺时更是如此。由于轴心部分质量较差和两端面长时间与锤头和下砧面接触，温降快、塑性差，拔长时易先从端面处开裂。

关于引起对角线裂纹和中心裂纹的变形力学方面的原因见第 3 章第 2 节，这两种裂纹的产生，还与坯料和加热情况等有关。

棒材中心的质量较周边差，中心部分碳化物偏析较严重，并且坯料愈粗，其质量愈差。如果坯料低倍疏松级别（这里指由于碳化物剥落而形成的中心疏松）大于 1 级，则很易锻裂，因此中心疏松一般规定不超过 1 级。用一般拔长方法常常产生裂纹时，可以用型砧或在摔子里进行拔长。但

用这种方法改善碳化物不均匀性的效果不太理想，故总的镦拔次数应增加。

加热质量好坏是影响锻造质量的一个重要因素。若加热温度过高，保温时间过长，将使材料过热，塑性降低；若加热速度过快，保温时间过短，则材料尚未热透，锻造时变形不均匀性加剧，也容易产生上述两种锻裂。但是，在这两种情况下的断口是不一样的，前一种（过热时）断口较粗糙，后一种断口较光洁。

高速钢在 800～900℃之间有相变，塑性较低，而且由于它含有大量的合金元素，再结晶温度较高，故终锻温度不宜过低，否则容易锻裂。但是，终锻温度也不宜过高。

为避免莱氏体高合金工具钢锻造变形时产生开裂，除了要保证坯料质量、加热质量和合适的锻造温度外，锻造时还应当注意下列几点：

1）打击不宜过重，必要时先铆镦，然后再镦粗，以便减小镦粗时的鼓肚。

2）拔长时相对送进量取 0.5～0.8，避免在同一处重复锤击。

3）采用“两轻一重”的锻造方法，即开始和终了时轻击，950～1 050℃时重击。

4）每次镦粗后拔长时，应先拔上端面，因为下端面与下砧接触时间长，冷却快，易锻裂（见图 10.2-14），先锻上端面，可以利用锻件本身的热量，使下端面温度得到一些回升。另外，开始锻造时，砧面应预热。

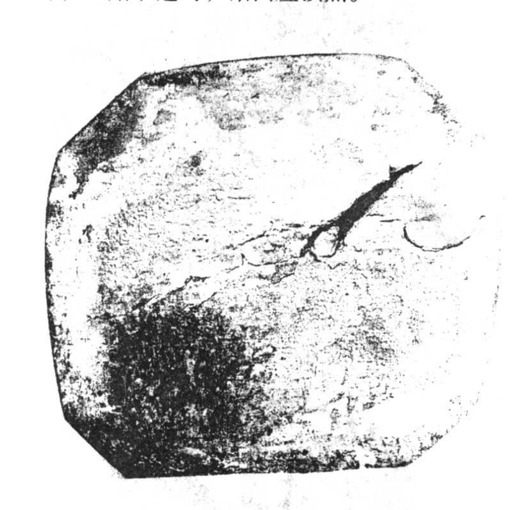


图 10.2-14　与下砧接触时间过长，使温度降低所引起的锻裂

5）对中心疏松较严重的材料，可用型砧或摔子进行拔长。圆柱形锻件的最后修光，最好在摔子内完成。

6）勤倒角，以避免温差和附加拉应力引起角裂。镦粗出现弯曲时，应立即校直。锻造过程中发现裂纹，应及时铲除。

7）砧子转角处应倒成适当的圆角。

莱氏体高合金工具钢锻后冷却过快时由于温度应力和组织应力较大，容易产生开裂，因此锻后应缓慢和均匀地冷却：堆冷、灰冷或砂冷，必要时进行炉冷。

莱氏体工具钢锻件在冷却到室温后心部金属由奥氏体变成马氏体时体积膨胀，表层金属受拉应力，这时表层已是淬硬的马氏体，塑性很低容易开裂，尤其当锻件尺寸较大时更是这样。由于心部残余奥氏体转变为马氏体要持续一段时间，所以莱氏体工具钢锻件应在 24 h 之内进行退火。退火的目的是消除内应力，增加工件韧性，降低硬度以便于加工。高速钢退火时必需装箱、密封，使其不产生氧化和脱碳。退火曲线见图 10.2-15。

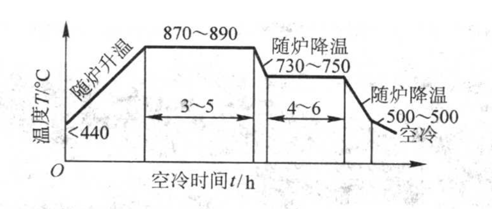


图 10.2-15　高速钢退火曲线

Cr12 型钢由于沿晶界和晶内有大量坚硬的碳化物存在，锻造时热效应比较严重，加之，其共晶温度低，因此，比高速钢更容易产生锻造过程中的过热和过烧现象。为此，在锻造操作中发现有升温现象时，应及时减轻锤击力量或稍停一会儿，待坯料冷却至正常锻造温度后，再增大锤击力。

由于 Cr12 型钢的锻造温度范围较窄，故每火次的变形量不能太大。

（4）萘状断口

萘状断口是一种脆性穿晶断口（图 10.2-16），断口上有许多取向不同、比较光滑的小平面，像萘状晶体一样闪闪发光。高速钢终锻温度过高、最后一次变形落入临界变形区和锻后的退火时间不充分时，就常形成萘状断口；连续两次淬火（中间不进行退火）时，也常易产生萘状断口。

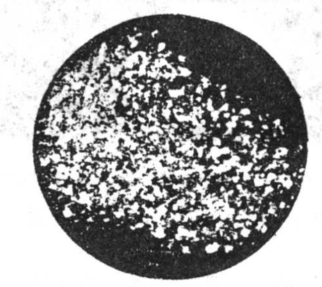


图 10.2-16　W18Cr4V 终锻温度过高引起的萘状断口

萘状断口使高速钢的韧性降低。使用时，刀具易崩刃。

为防止萘状断口，最后一次的终锻温度应低于 950℃，一般应控制在 900～950℃之间，而且最后一火应有足够的变形量。当发生意外情况，在最后一火没有完工的锻件，允许加热再锻，但加热温度不要超过 1 000℃。如需第二次淬火时，应进行中间退火。

2　不锈耐酸钢塑性成形件的常见缺陷与控制措施

不锈耐酸钢是不锈钢和耐酸钢的总称。在大气中能抗腐蚀的钢称为不锈钢。在某些化学侵蚀性介质（如河水、海水、盐、碱和某些酸溶液）中能抵抗腐蚀的钢称为耐酸钢。

不锈耐酸钢除要求耐蚀性外，还要求具有一定的力学性能、焊接性能、冷变形性能和切削性能等以满足构件的使用要求。为此在钢中加入大量的 Cr、Ni、Mn、Ti 等合金元素，其中 Cr 是提高防腐蚀性能的主要元素。

不锈耐酸钢按组织可分为铁素体、奥氏体和马氏体三大类。也有介于两类之间的。在某些文献资料中将不锈耐酸钢分为五类（增加了奥氏体铁素体双相不锈钢和沉淀硬化型不锈钢），但从塑性加工工艺角度考虑，以分三类为宜。

2.1　铁素体不锈钢

该类钢具有良好的耐酸性，常用作制造硝酸、磷酸、次氯酸钠等的设备、换热器、蛇形管、蒸气过热器管道以及食品工厂设备等。

常用的一部分铁素体不锈耐酸钢的牌号及成分见表 10.2-5。



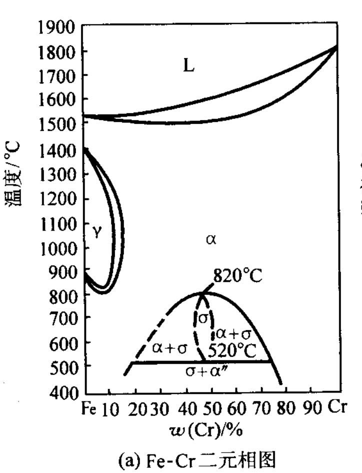
表 10.2-5　铁素体型不锈耐酸钢的牌号和成分

钢号	化学成分（质量分数）/%								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Ti	Mo
1Cr17	≤0.12	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.035	16～18			
1Cr28	≤0.15	≤1.00	≤0.80	≤0.030	≤0.035	27～30		≤0.20	
1Cr17Ti	≤0.12	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.035	16～18		5×w（C）～0.8%	
1Cr25Ti	≤0.12	≤1.00	≤0.80	≤0.030	≤0.035	24～27		5×w（C）～0.8%	
1Cr17Mo2Ti	≤0.10	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.035	16～18		≤7×w（C）	1.6～1.9

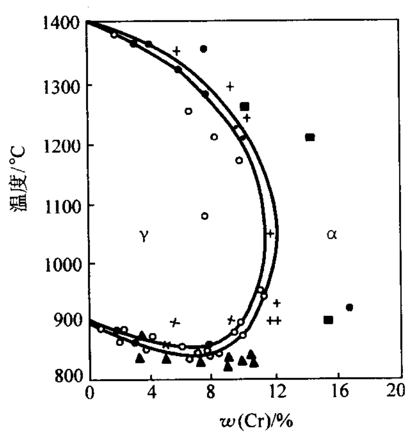
由表 10.2-5 中可见，铁素体不锈耐酸钢中加入了大量的 Cr、Si 等合金元素。钢中加入 Cr 是为了提高钢的电极电位，增强钢的抗腐蚀能力，Si 也有和 Cr 同样的作用。

不锈钢中加入约 2%Si（质量分数）可提高在硫酸和盐酸中的抗腐蚀性。但 Si 量过高将使钢的塑性急剧降低，Si 量大于 4%～5%（质量分数）后就不易锻轧加工，更不易冷变形。

由 Fe-Cr 二元相图（见图 10.2-17）可知，当钢中 Cr＞12.5%（质量分数）时，钢液结晶后始终保持 α 铁素体组织，加热和冷却时不发生同素异构转变，故不能通过热处理方法来细化组织。该类钢加热至 475℃附近或自高温缓冷至 475℃附近时，有 α″析出，产生脆化现象，即所谓 475℃脆性。该类钢在 820～520℃长期加热或缓冷将析出 σ 相，引起钢的脆化。



(a) Fe-Cr 二元相图



(b) Fe-Cr 二元相图的左下角部分

图 10.2-17　Fe-Cr 二元相图

（1）铁素体不锈耐酸钢的锻造特点

1）该类钢的再结晶温度低、再结晶速度快，加热温度超过 900℃后，晶粒迅速长大（见图 10.2-18）。

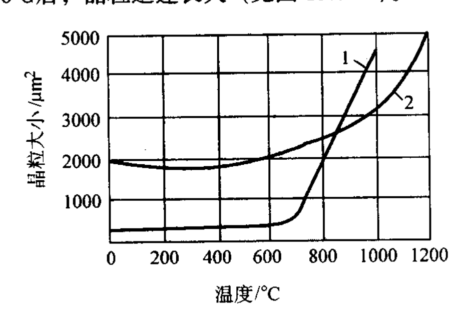


图 10.2-18　晶粒大小随温度的变化

1—铁素体钢　2—奥氏体钢

2）该类钢的塑性较差，尤其是该类钢的钢锭为粗大晶粒的柱状晶，塑性很低。

3）该类钢的导热性差，热胀系数大。加热和冷却过程中的温度应力较大。

4）该类钢在 820～520℃附近长期加热或缓慢冷却时有 σ 相和 α″相析出，引起脆性。

（2）锻造过程中的主要缺陷与控制措施

1）晶粒粗大。铁素体钢的晶粒度对性能有很大影响。粗晶使铁素体钢的室温力学性能和抗腐蚀性能下降。晶粒很粗大时，钢的脆性很大，甚至锻件切边时，就会出现裂纹。

该类钢于 600℃时晶粒就开始长大，950℃以上发生晶粒急剧长大的现象，随着加热温度和加热时间增加，能产生较粗大的晶粒。而且该类钢是无同素异构转变的单相钢，不能用热处理的方法细化晶粒。防止晶粒粗大的措施是：

① 锻造该类钢时，加热温度应＜1 150℃；900℃以上要快速加热，尽量缩短高温停留时间。

② 变形程度应足够大，最后一火次的锻造变形量不应

小于30%。

③ 终锻温度应不高于800℃。但是为了避免温度过低产生加工硬化，终锻温度不应低于700℃，通常选用750℃。

2）裂纹。该类钢导热性差、塑性低，尤其是钢锭为粗大晶粒的柱状晶，塑性很低，锻造过程中很易开裂。防止裂纹的措施是：

① 钢锭应预先进行退火处理。钢锭表面必须经过修磨或扒皮，不允许有任何缺陷存在，否则将会在锻造过程中产生严重开裂。

② 钢锭入炉温度应≤700℃，热锭装炉温度不限；在760℃以前应缓慢升温，加热速度一般为0.5～1 mm/min，但900℃以上要快速加热，钢锭加热温度为1 100～1 150℃，钢坯加热温度为1 100～1 130℃；钢锭加热到规定的均热阶段时，必须勤翻料，以保证锭料出炉时阴阳面温差较小。

③ 锻造过程中要注意轻击快打，尤其是第一火要勤打、勤翻、勤倒角，其目的是提高钢的塑性，避免锻裂；锻造方坯时不要出棱角，防止因棱角温度低而开裂；锻造中发生鱼鳞状裂纹时，继续锻打即可消除。

3）σ脆性和475℃脆性。高铬铁素体不锈钢常易产生σ脆性和475℃脆性。前面已经介绍，这两种脆性分别是在820～520℃和475℃附近长期加热或缓慢冷却时由于σ相和α″相的沉淀引起的。当加热温度超过上述两个温度范围时，σ相和α″相将迅速溶入基体。而锻造加热温度均超过1 100℃，故在锻造加热过程中不会引起σ脆性和475℃脆性。因此，为了防止σ脆性和475℃脆性的产生，关键是控制锻后的冷却速度。该类钢锻后应分散空冷，快速通过上述两个脆化区。

2.2 奥氏体（包括奥氏体-铁素体）不锈钢

镍铬奥氏体不锈耐酸钢，除了有较好的耐蚀性、室温及低温韧性外，还具有良好的工艺性能。这类钢突出的冷变形性能是铁素体不锈钢所不及的，因此，该类钢得到了广泛应用。该类 钢常冷轧后用以制造不锈钢结构及零件、无磁性零件等。1Cr18Ni9Ti是目前应用最广的一种，它被用来制作在610℃以下长期工作的锅炉和汽轮机的零件以及化工中各种阀门零件。

我国常用的奥氏体型不锈耐酸钢的牌号和成分见表10.2-6。现以1Cr18Ni9Ti为例对该类钢的特点介绍如下。

表 10.2-6 奥氏体型不锈耐酸钢的牌号和成分

钢 号	化学成分（质量分数）/%										
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Ti	Mo	Nb	其他
0Cr18Ni9	≤0.06	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17～19	8～11				
1Cr18Ni9	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17～19	8～11				
2Cr18Ni9	0.13～0.22	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17～19	8～11				
0Cr18Ni9Ti	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17～19	8～11	5×w（C）～0.7%			
1Cr18Ni9Ti	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17～19	8～11	5（w（C）－0.02%）～0.8%			
1Cr18Ni11Nb	≤0.10	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17～20	9～13			8×w(C)	
2Cr13Ni4Mn9	0.15～0.25	≤1.00	8～10	≤0.030	≤0.060	12～14	3.7～5.0				
1Cr18Ni12Mo2Ti	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	16～19	11～14	5（w（C）－0.02%）～0.8%	1.8～2.5		
0Cr18Ni18Mo2Cu2Ti	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17～19	17～19	≥7×w（C）	1.8～2.2		Cu：1.8～2.2
4Cr14Ni14W2Mo	0.4～0.5	≤0.80	≤0.70			13～15	13～15		0.25～0.40		W：2.0～2.75

1Cr18Ni9Ti钢属于奥氏体型不锈耐酸钢，其相图见图10.2-19。由该图可知，经过1 050～1 100℃的淬火处理（水中或空气中）后呈单相奥氏体组织，它在不同温度和浓度下的各种强腐蚀介质中（如硝酸、大部分有机酸和无机酸的水溶液、磷酸、碱及煤气等）均有良好的耐酸蚀性，在空气中热稳定性也很高，达850℃。但当钢中铁素体形成元素（Cr、Ti、Si）含量增加时，就可能出现α相，使塑性降低，化学稳定性下降。另外，加热温度过高时，则由γ区进入α+γ区，也会使α铁素体量增多，高温塑性显著下降。在700～900℃区间如加热和冷却缓慢则都将有σ相析出。σ相是非常脆的金属间化合物，σ相的出现会使不锈钢塑性降低。因此在该温度区间要快热和急冷。奥氏体不锈耐酸钢的锻造特点是：

1）由于钢内含有大量Cr、Ni等合金元素，使再结晶温度升高、速度减慢。

2）由于钢内含有大量Cr、Ni等合金元素，使其变形抗力增大。18-8型钢的变形抗力大约是碳钢的1.5倍。

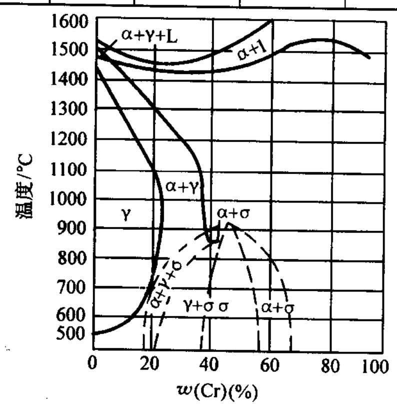


图 10.2-19 铁－铬状态图

3）导热性差。1Cr18Ni9Ti钢在低温区热导率仅为普通钢的1/3［室温下碳钢热导率为41.868 W/(m·℃)；而这种钢



100℃时为 16.132 W/（m·℃），500℃时为 22.123 W/（m·℃）]，随着温度升高热导率也提高。

4）锻造温度范围窄，因为始锻温度过高时，铁素体量增多，使塑性下降；另外，1Crl8Ni9Ti 钢具有高温晶粒粗化倾向（见图 10.2-20），这种粗大晶粒不能用热处理相变方法来细化，其加热温度应低于 1 200℃。在 700～900℃区间有 σ 相析出，使塑性降低，因此终锻温度也不能过低。一般始锻温度为 1 150～1 180℃，终锻温度为 850～900℃。

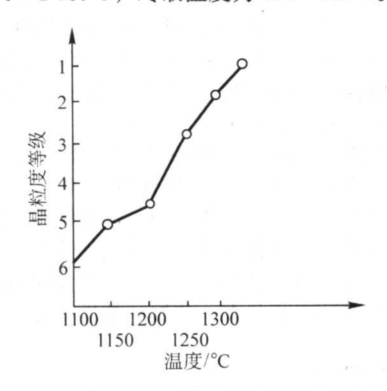


图 10.2-20 1Cr18Ni9Ti 高温晶粒粗化曲线

锻造过程中的主要缺陷和控制措施如下。

（1）晶界贫铬，抗晶间腐蚀性能下降

该类钢的零件在工作中破坏的主要原因常常是晶间腐蚀，晶间腐蚀的原因是由于晶界贫铬。晶界附近基体中的铬含量低于一定数值时，电极电位显著降低，使材料抗晶间腐蚀性能明显下降。引起奥氏体钢晶界附近贫铬的原因是：

1）加热产生渗碳现象时，碳与铬在晶界区形成大量碳化铬。

2）在低于 900℃时，缓冷或缓慢加热，沿晶界析出含铬量高的金属间化合物 σ 相。

3）在 500～900℃缓冷或缓慢加热，沿晶界有铬的碳化物析出。

因此，这类钢应当在微氧化气氛中加热，在加热和冷却时应迅速通过碳化物和 σ 相析出的温度范围，并且锻后应进行固溶处理，使已析出的碳化物和 σ 相重新溶入奥氏体，以得到均匀单一的常温奥氏体组织。固溶温度一般为 1 020～1 050℃，采用水冷。为防止晶粒长大，固溶温度不宜过高，保温时间不宜过长。

（2）晶粒粗大

晶粒度对奥氏体钢性能的影响没有高温合金明显，但是晶粒粗大也引起力学性能、抗晶间腐蚀性能和焊接工艺性能降低。对需要进行氮化处理的 4Cr14Nil4W2Mo、2Cr18Ni2W2 等奥氏体钢零件，要求锻件晶粒度≥6 级，否则，氮化层要起皮剥落。奥氏体钢无同素异构转变，因此锻造加热温度和变形程度对晶粒度有很大影响。为了获得细小而均匀的晶粒组织，最后一火应具有足够大的变形量。对于不同的锻件和工序，应依其变形量不同，采用不同的加热温度。例如，2Cr18Ni8W2 衬套锻件要求晶粒度≥6 级，某厂原工艺加热温度为（1 160 + 20）℃，晶粒 3～5 级；后来加热温度改为 (1 120 + 20)℃时，晶粒度就达到了 6～7 级。

（3）铁素体带状组织和裂纹

奥氏体 - 铁素体钢中含有 α 铁素体。在某些奥氏体钢中（如 1Crl8Ni9Ti 钢），也会出现 α 铁素体。这类钢在变形时，α 铁素体沿主伸长方向被拉长形成带状组织，并且很易沿铁素体带开裂。α 铁素体带的出现，将会降低锻件的横向力学性能，增加锻件的缺口敏感性，并使之具有磁性，同时锻后酸洗时，还会引起过腐蚀缺陷。

铸锭中的 α 铁素体的数量往往高于轧材，因为轧前的加热已使 α 铁素体部分地溶解于奥氏体中。因此，为了保证奥氏体钢具有适当的可锻性，必须控制原材料中 α 铁素体的含量。一般要求奥氏体钢中 α 铁素体≤2.5 级（约 12%）。对于 α 铁素体含量较高的原材料，为避免锻造时开裂，不应采用拉应力较大的镦粗、冲孔等工序。在这种变形工序中，当 α 铁素体 > 1 级（5%）时，即可能出现裂纹。

对 α 铁素体较多的原材料，加热时可适当延长保温时间或采用锻前固溶处理（见图 10.2-21～图 10.2-24），使钢中的铁素体溶解于奥氏体中，或聚集变圆，或由带状变成链状，以改善钢的塑性。图片 10.2-21、图 10.2-22 是 1Crl8Ni9Ti 钢的过热组织，图 10.2-23、图 10.2-24 是将其加热到 1 050℃保温 2 h，正火后的组织。



图 10.2-21 1Cr18Ni9Ti 钢 A 锻坯正火前的过热组织（α 相呈针状及网状分布） **400 ×**



图 10.2-22 B 锻坯正火前过热组织
（α 相呈针状及网状分布） **400 ×**

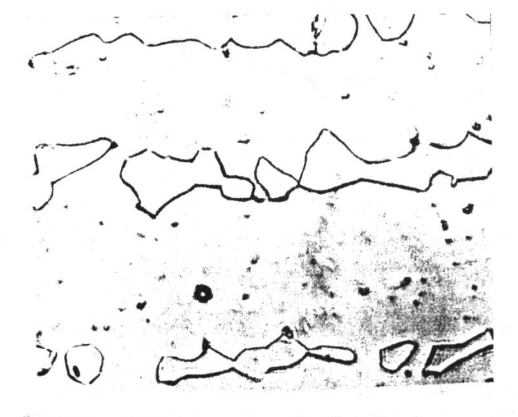


图 10.2-23 A 锻坯正火后的高倍组织
（针状及网状 α 相消失） **400 ×**



图 10.2-24 B锻坯正火后的高倍组织
（针状及网状α相消失） 400×

奥氏体钢钢锭的柱状晶很粗大，钢锭和钢坯的表面缺陷较多，为避免锻造时开裂，加热前需用机械加工方法除去表面缺陷。锻造钢锭时，开始应轻压，当变形量超过30%后才能重压；锻造过程中，应注意操作方法，提高变形的均匀性，尽量减小附加拉应力。

2.3 马氏体（包括马氏体-铁素体）不锈钢

马氏体不锈钢包括含碳量在0.05%～0.45%（质量分数）的各种Cr13型不锈钢和9Cr18不锈钢。该类钢在弱腐蚀介质中，温度不超过30℃的条件下有良好的耐蚀性。在淡水、海水、蒸气、空气条件下也有足够的耐蚀性。0Cr13、1Cr13及2Cr13一般用作较高韧性与受冲击负荷的零件。例如汽轮机叶片、水压机阀。3Cr13一般用作有较高硬度要求的热油泵轴及阀门等零部件。4Cr13、9Cr18等用作切削、测量、外科医疗工具、弹簧和滚珠轴承等。

我国常用的马氏体不锈耐酸钢的牌号和成分见表10.2-7。图10.2-25为含12%Cr（质量分数）、0～1%C（质量分数）的合金状态图。由状态图可知，这类钢在室温下的平衡组织是由铁素体加碳化物组成。该类钢加热到 Ac_3 和Acm点以上的一定温度呈单一的奥氏体相。如果加热温度过高，则由单相状态过渡到双相状态，使钢的塑性下降。

表 10.2-7 马氏体型不锈耐酸钢的牌号和成分

钢号	化学成分（质量分数）/%									
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	V	其他
* 0Cr13	≤0.08	≤0.60	≤0.80	≤0.030	≤0.035	12～14				
* 1Cr13	0.08～0.15	≤0.60	≤0.80	≤0.030	≤0.035	12～14				
* Cr17Ni2	0.11～0.17	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.035	16～18	1.5～2.5			
2Cr13	0.16～0.24	≤0.60	≤0.80	≤0.030	≤0.035	12～14				
3Cr13	0.25～0.34	≤0.60	≤0.80	≤0.030	≤0.035	12～14				
4Cr13	0.35～0.45	≤0.60	≤0.80	≤0.030	≤0.035	12～14				
9Cr18	0.90～1.00	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.035	17～19				
9Cr18MoV	0.85～0.95	≤0.80	≤0.80	≤0.030	<0.035	17～19		1.0～1.3	0.07～0.12	
1Cr11Ni2W2MoV	0.10～0.16	≤0.60	≤0.60	≤0.025	<0.030	10.5～12	1.4～1.8	0.35～0.50	0.18～0.30	W：1.5～2.0

注：表中有＊者为马氏体-铁素体型不锈钢。

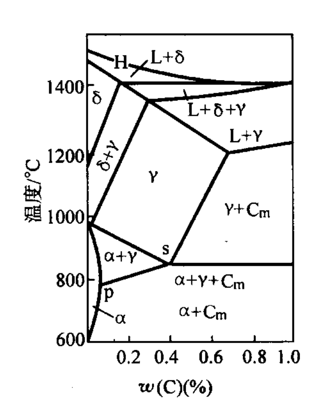


图 10.2-25 含 12w（Cr）%为（质量分数），w（C）为0～1%（质量分数）的合金状态图

该类钢从淬火温度空冷至室温，钢的组织全部由马氏体组成。

由于该类钢有同素异构转变，可以用热处理方法细化晶粒，因此，对锻造时的变形工艺要求不像奥氏体和铁素体钢那样严格。但是该类钢由于空冷就形成马氏体，产生的组织应力很大，因此锻后空冷是很重要的一环。

马氏体不锈耐酸钢的锻造特点：

1）该类钢加热高于一定温度后出现δ铁素体，进入双相状态，变形时极易引起裂纹。该类钢开始出现δ铁素体的温度大约在1 150℃左右，因此，始锻温度一般取为1 150℃。终锻温度应高于Ar1，对含碳量低的钢可取为850℃，对于含碳量高的钢取为950℃。

2）马氏体不锈耐酸钢锻造加热温度过高，变形程度太小或变形不均时，冷却后原粗大奥氏体晶粒形成粗大马氏体组织，且低倍粗晶的倾向性大。

3）该类钢空冷即形成马氏体组织，锻后应缓冷，以防由于组织应力和热应力的作用使锻件产生冷却裂纹。

锻造过程中的主要缺陷与控制措施如下。

（1）锻造裂纹

该类钢含铁素体形成元素较多，使相图中的铁素体区大大右移。加热过程中在高于一定温度后出现δ铁素体。加热温度越高，保温时间越长，δ铁素体数量越多。结果使该类钢处于两相区状态下，因此变形时极易引起锻造裂纹。

锻件内出现δ铁素体后，要降低钢的横向力学性能，增大缺口敏感性并且容易过腐蚀。这种缺陷用一般热处理工艺不能消除。此类钢出现δ铁素体的温度大致在1150℃左右，加热时要予以控制。另外，锻造时避免金属快速流动，防止



由于热效应引起局部过热，出现 δ 铁素体而使钢的可锻性降低。

该类钢锻件中的 δ 铁素体，有时是由原材料带来的。因此，应控制原材料中 δ 铁素体的含量。

(2) 冷却裂纹

该类钢对冷却速度特别敏感，锻后空冷也会形成较大的组织应力和热应力，使锻件产生冷却裂纹，对较薄的锻件尤其如此。因此该类钢锻件锻后应经热处理，待消除应力后再行酸洗，否则容易出现应力腐蚀裂纹。锻后未缓冷而后又未及时消除残余应力的锻件，在空气中放置时间过长，也会出现应力裂纹和应力腐蚀裂纹。因此，这类钢锻后应缓冷（一般在 200℃砂坑或炉渣中缓冷），并及时进行热处理，以消除内应力。在锻造过程中，要防止水等冷却模具的介质喷到锻件上，以免引起局部开裂。

(3) 组织粗大和低倍粗晶

对于马氏体不锈钢，若锻造时加热温度过高，锻造变形太小或变形不均匀，则冷却后原粗大奥氏体晶粒形成粗大马氏体组织，且低倍粗晶的倾向性极大。往往在锻件热处理后，出现低倍粗晶和组织粗大的缺陷。这种粗大组织的遗传性很强，比较顽固，锻后热处理也难以消除。

马氏体不锈钢的这种组织粗大和低倍粗晶缺陷使钢的韧性、塑性和疲劳性能下降，因此应加以预防。详见第一章过热、过烧一节。

Cr17Ni2、1Cr13 属于马氏体-铁素体钢，其锻造特点和易出现的质量问题与马氏体不锈钢相似。该类钢含有较多的初生 α 铁素体，其铁素体的含量随加热温度和保温时间的增加而增多。该钢由于是双相组织，塑性较低，特别容易出现铁素体带，这将使锻件的横向性能，特别是塑性指标的冲击韧度剧烈降低，见表 10.2-8。因此，锻前加热温度通常不超过 1 180℃，始锻温度一般为 1 100 ~ 1 150℃。该类钢终锻温度一般不应低于 800℃，否则会出现加工硬化现象，变形抗力增大，而且易出裂纹。当钢中含微量铅、锡、砷时，其塑性将下降更大。该类钢有形成龟裂和撕裂的倾向。

该类钢锻后冷却有马氏体转变，快冷时易形成裂纹。钢的含碳量越高，产生裂纹的倾向性越大。

表 10.2-8　带状组织对 Cr17Ni2 钢力学性能的影响

取样方向	力学性能（平均值）					
	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	ψ/%	HB	a_K /MJ·m^{-2}
纵向 0°	935	716	18.7	59.1	3.64	1.15
横向 90°	917	703	15.9	46.3	3.64	0.26
弦向 45°	925	711	18.7	57.1	3.65	0.59

3　高温合金塑性成形件的常见缺陷与控制措施

高温合金主要用于制造燃气涡轮发动机的重要零件，如涡轮叶片、涡轮盘、承力环、火焰筒安装座等。此类零件不仅要求具有很高的高温性能和良好的疲劳性能，而且要求具有抗氧化、抗腐蚀性能和一定的塑性。

变形高温合金可分为铁基、镍基和钴基合金三类，这里主要介绍前两类。

我国常用的合金牌号有 GH3030、GH32、GH4033、GH34、GH2036、GH4037、GH4043、GH4049、GH2130、GH2135、GH1140 和 GH220 等。其中 GH34、GH2036、GH2130、GH2135、GH1140 是铁基高温合金，其余的是镍基高温合金。在这些高温合金中含有大量的 Cr、Ni、Ti、Al、W、Mo、V、Co、Nb、B、Ce 等合金元素。就铁基高温合金来说，加入较多的 Cr 是为保证合金在高温下的抗氧化能力；加入较多的镍，一方面是为保证得到奥氏体基体，另一方面是与钛、铝生成合金的主要强化相 Ni3（Ti、Al），还有一个方面是镍和铬配合使用能够提高合金的抗氧化能力；加入高熔点的金属元素如 W、Mo、V、Co 等来提高合金的再结晶温度；加入 W、Mo、V、Nb 等强烈的碳化物形成元素和合金中微量的碳作用，生成高度分散的高熔点的碳化物粒子，它们主要分布在晶界处，是强化相；加入硼是为了生成硼和金属元素间的硼化物，硼化物分布在晶界处，是强化晶界的主要强化相；铈的加入是为了进一步清除液态合金中的杂质元素，因而使合金晶界处得到净化，有较紧密的结合，有较高的强度。

我国高温合金特别是镍基耐热合金的冶炼方法主要是电弧炉、电弧炉 + 真空自耗、电弧炉 + 电渣重熔。为了提高合金的纯度以提高合金的性能，往往采用电弧炉 + 真空自耗。但该种冶炼方法往往由于杂质少，易出现粗晶缺陷。

耐热合金铸锭中存在的冶金缺陷较多，例如铸锭中柱状组织较为发达，存在显微疏松和枝状疏松以及各种宏观及微观不均匀组织，致使铸态合金的性能较低，经过热塑性变形后合金的性能有较大提高，随总变形程度增大，高温合金纵向纤维试样的力学性能，也和普通结构钢一样有规律地提高，但其横向试样的力学性能不像结构钢那样剧烈下降，而是变化较小。这是由于：具有均匀固溶体的单相高温合金，在变形及随后的再结晶所获得的晶体位向与主变形方向仅有较小的重合，这就减小了纤维纵向和横向力学性能之间的差别。而结构钢通常具有多相组织，在塑性变形过程中所获得的纵向上的方向性组织在再结晶后仍部分地保留下来，加之结构钢的杂质较多，它们沿纵向被拉长，这就使得其纵向和横向性能间的差别较大。

为了获得较高的力学性能，高温合金的总压缩比通常控制在 4 ~ 10 范围内。

晶粒尺寸对高温合金的性能有较大影响，从室温力学性能的角度看，晶粒愈细愈好。例如 GH2135 合金，当晶粒度从 4 ~ 6 级细化到 7 ~ 9 级时，室温疲劳强度从 290 MPa 提高到 400 MPa，但从高温性能角度看，晶粒适当粗些可使晶界总面积减少，有利于提高合金的持久强度。对于高温合金来说，晶粒大小不均匀是最有害的，它将使持久强度和抗蠕变强度显著降低。因此，综合晶粒度对室温和高温性能的影响，取均匀适中晶粒为宜。

高温合金锻件晶粒的最终尺寸除与固溶温度等有关外，还与固溶前锻件的组织状态有很大关系。如果锻后是未再结晶的组织，而且处于临界变形程度时，固溶处理后将形成粗大晶粒；如果锻后是完全再结晶组织，固溶处理后一般可以获得较细较均匀的晶粒；如果锻后是不完全再结晶组织，固溶处理后晶粒将是大小不均匀的。锻件的组织状态取决于锻造温度和变形程度，应注意控制。

高温合金的锻造特点如下。

1) 塑性低。高温合金由于合金化程度很高，具有组织的多相性且相成分复杂，因此，工艺塑性较低。特别是在高温下，当含有 S、Pb、Sn 等杂质元素时，往往削弱了晶粒间的结合力而引起塑性降低。

高温合金一般用强化元素铝、钛的总含量来判断塑性高低，当总含量≥6%（质量分数）时，塑性将很低。镍基高温合金的工艺塑性比铁基高温合金低。高温合金的工艺塑性对变形速度和应力状态很敏感。有些合金铸锭和中间坯料需采用低速变形和包套镦粗、包套轧制甚至包套挤压才能成形。

2）变形抗力大。由于高温合金成分复杂，再结晶温度高，再结晶速度慢，在变形温度下具有较高的变形抗力和硬化倾向。变形抗力一般为普通结构钢的4～7倍。

3）锻造温度范围窄。高温合金与碳钢相比，熔点低，加热温度过高容易引起过热、过烧。若停锻温度过低，则塑性低、变形抗力大，且易产生冷热混合变形导致锻件产生不均匀粗晶。因此，高温合金锻造温度范围很窄，一般才200℃左右。而镍基耐热合金的锻造温度范围更窄，多数在100～150℃，有的甚至小于100℃。

4）导热性差。高温合金低温的热导率较碳钢低得多，所以，一般在700～800°C范围需缓慢预热，否则会引起很大的温度应力，使加热金属处于脆性状态。

高温合金锻件，除了因原材料冶金质量不良引起的非金属夹杂、异金属夹杂、带状组织、分层、碳化物堆积、点状偏析、残留缩孔和疏松等缺陷外，由于锻造工艺不当经常出现的缺陷有下面几种。

（1）粗晶

粗晶是指在锻件中存在有晶粒粗大或晶粒大小不均匀的组织。它是高温合金锻件中最常见的一种缺陷。粗晶使材料的疲劳和持久性能明显下降。涡轮叶片、涡轮盘等重要零件，对粗晶均有严格要求。

粗晶产生的主要原因有：变形温度低于或接近于合金再结晶温度，加热温度过高，变形程度小（处于临界变形程度范围内）或变形不均匀，以及合金成分控制不当等。具体介绍如下。

锻造加热温度过高或原始晶粒过大，锻造时变形分布不均匀或变形小的部分落入临界变形范围；或锻造温度过低，形成冷热混合变形，固溶处理后在锻件体内将产生晶粒大小不均匀。防止的措施是控制好加热和锻造温度；改善坯料形状，使模锻时各断面变形尽量均匀一致；以及采用原始晶粒度小的坯料等。

锻造时若表层金属变形程度小，落入临界变形范围或终锻时锻件表面温度低于合金的再结晶温度，留下加工硬化痕迹，固溶处理后将产生表面粗大晶粒。防止的措施是将模具预热温度提高到350℃，操作工具预热至150℃，采用效果良好的润滑剂，加快操作，防止闷模使金属表面温度急剧下降，最好整个模锻操作时间不超过10 s。

在其他条件正常的情况下如固溶温度过高将产生锻件整体粗晶。

当合金中存在钛氮化合物、硼氮化合物等，形成偏析时，这些化合物偏析都阻碍晶粒长大，因此，锻件中有这类偏析的部分，具有细小的晶粒和较高的硬度，没有这类偏析的部分，晶粒则比较粗大，导致在锻件内形成大小不均匀的晶粒。

GH88合金增压器叶片锻造时，当锻造加热为1 070℃，30 min和1 180℃，45 min，以及锻造中不涂润滑剂时，经正常热处理（1 180℃，1 h水淬＋800℃，16 h时效）后的叶片锻件皆出现不同程度的粗晶（见图10.2-26～图10.2-29）。该叶片的原坯料为均匀细小的晶粒组织（见图10.2-30）。当锻造加热为1 070℃，30 min时，叶片的表层温度低，发生了不均匀变形，表层金属处于临界变形程度范围内，热处理后导致叶片产生粗晶。而当锻造加热为1 180℃，45 min时，由于临界变形，处于叶背的表层金属在高温下发生了聚集再结晶，因此形成了粗晶。当叶片模锻时不涂润滑剂，由于表层摩擦力大，使叶片发生了不均匀变形，在叶身内必然有某一部位处于临界变形，导致出现粗晶。当选用适宜的加热规范（1 130℃，30 min）和改善润滑条件后，叶片基本上不再出现粗晶，其低倍组织及高倍组织见图10.2-31、图10.2-32。

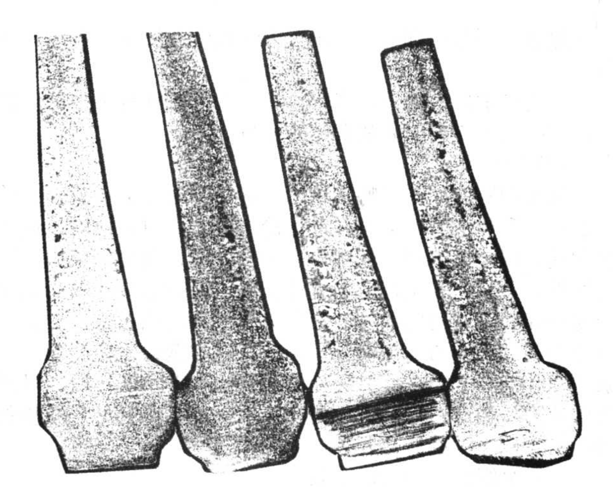


图10.2-26　1 070℃，30 min加热模锻的叶片低倍组织（叶脊及叶盆处晶粒粗大）

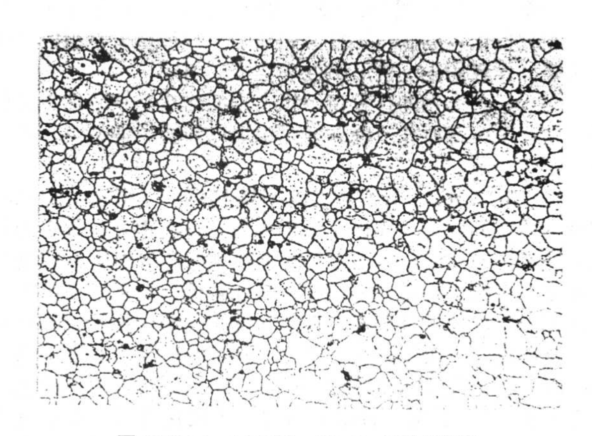


图10.2-27　1 180℃，45 min加热模锻的叶片叶身中部的晶粒情况　100×



图10.2-28　1 180℃，45 min加热模锻的叶片叶背的粗大晶粒　100×

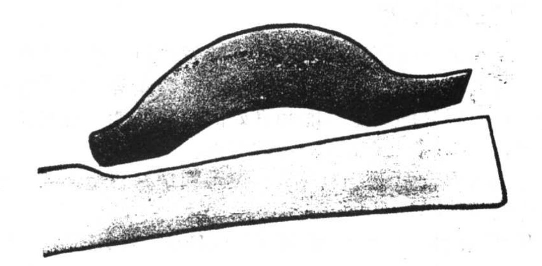


图10.2-29　不涂润滑剂模锻的叶片叶身粗晶情况



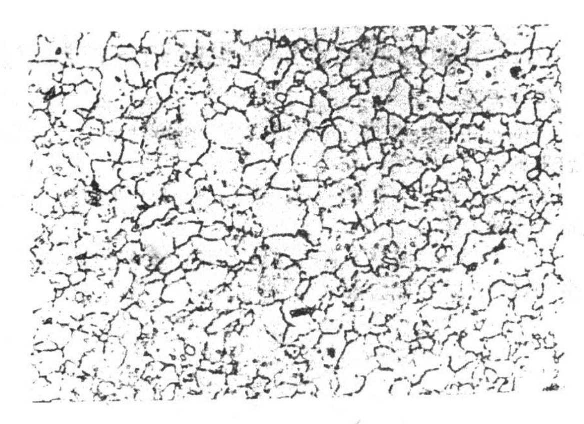


图 10.2-30 GH88 合金原棒材均匀细小的晶粒组织 400×

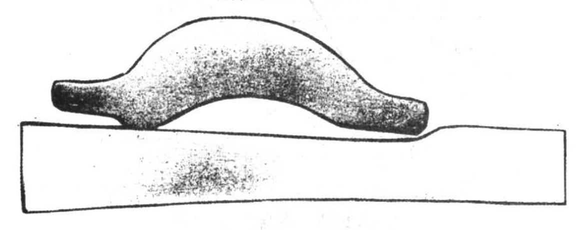


图 10.2-31 1 130℃/30 min 加热模锻的叶片的低倍组织（粗晶基本消除）

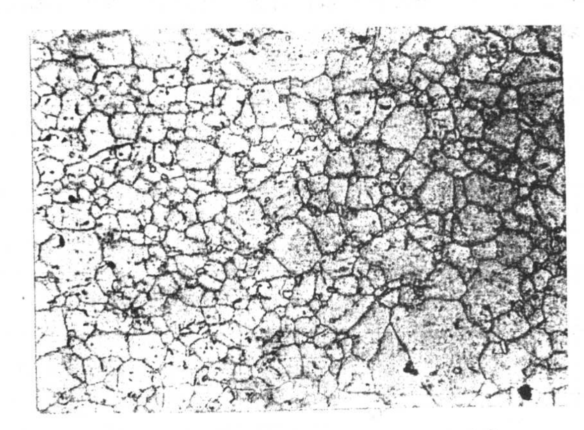


图 10.2-32 1 130℃/30 min 加热模锻的叶片叶身的晶粒情况 100×

为避免高温合金锻件产生粗晶，生产中还应注意如下问题：

1）高温合金锻件的粗晶，与原材料及锻造工艺过程中各个环节（包括加热、变形、模具、润滑、操作等）均有关系。因此，为保证锻件质量稳定，工艺编制要详细、正确，执行工艺要严格、准确。高温合金的重要锻件，即使小批量生产，也应采用模锻。

2）不同牌号高温合金的再结晶特性有所不同。例如，多数高温合金的临界变形程度为 3%～5%，而 GH2135 合金为 4%～6%，锻造时应使各处变形程度超过上述数值。

3）不同冶炼方法、不同炉号的同牌号高温合金，由于化学成分的实际含量有差别，因此实际再结晶温度和聚集再结晶温度常常是不一样的。强碳化物和金属间化合物的形成元素碳、铝、钛等的影响更为明显。例如，生产和试验证明：不同冶炼方法、不同炉号的 GH33 合金，其适宜的最高加热温度在 1 070～1 140℃之间变化。因此应根据各批材料的情况采用具体的有效措施。

（2）裂纹

高温合金由于塑性差，锻造时经常出现各种裂纹。尤其是铸锭，由于具有粗大的柱状晶，锻造时更易开裂。产生裂纹的原因主要有：

1）有害杂质含量多，铅、铋、锡、锑、砷、硫等都是高温合金中的有害杂质，这些元素的熔点低，在合金中分布于晶界上，降低了合金的塑性。

2）合金中某些元素（例如，GH4037 中的硅、硼及 GH2132、GH2135 中的硼）含量偏高，它们在合金中形成脆性化合物，并沿晶界分布，使合金的塑性降低。

3）铸锭表面和内部的质量差，或棒材中存在某些冶金缺陷（例如：夹杂物、分层、缩孔残留、疏松、点状偏析、碳化物堆积等），锻造时引起开裂。

4）在火焰炉中加热时，燃料和炉气中含硫量过高，硫与镍作用后形成低熔点共晶体，沿晶界分布，降低了合金的塑性。

5）装炉温度过高，升温速度过快，尤其在加热铸锭和断面尺寸大的坯料时，由于合金导热性差，温度应力大，易引起炸裂。

6）加热温度过高或变形温度过低。

7）变形程度过大或变形速度过快。

8）变形工艺不当，存在较大的拉应力和附加拉应力。

为防止产生裂纹，应当采取如下对策：

1）对原材料应按标准进行检查，要严格控制有害元素的含量。某些有害元素（例如硼）过多时，可适当降低锻造加热温度。

2）铸锭需经扒皮或砂轮清理后，才能加热锻造。

3）加热时应控制装炉温度和升温速度。

4）在火焰炉中加热时应避免燃料中含硫量过高。同时，也不应在强氧化性介质中加热，以免氧扩散到合金中，使合金塑性下降。

5）要注意控制加热和变形温度。

6）铸锭拔长时，开始应轻击，待铸态组织得到了适当破碎，塑性有所提高后，再增大变形量。拔长时的每火次总变形量应控制在 30%～70%范围内，不应在一处连击，应采用螺旋式锻造法，并应从大头向尾部送进。

对于塑性很低的合金铸锭和中间坯，可采用塑性垫、包套镦粗等变形工艺。

7）工模具应进行预热（预热温度一般为 150～350℃），锻造和模锻时应进行良好的润滑。

（3）过热、过烧

若合金的加热温度过高，高温保温时间过长，则晶粒急剧长大，晶界变粗变直，析出相沿晶界呈条状和网状分布，使合金塑性降低，锻造时易产生开裂，同时还引起合金元素贫化。若进一步提高加热温度，则晶界上的低熔点相将发生氧化和熔化，形成三角晶界，使晶粒松弛并产生掉晶现象，锻造时产生碎裂。

过热、过烧后的合金组织是不能用随后的固溶处理加以消除的，故应严格控制加热温度。

（4）合金元素贫化

高温合金加热时，常产生碳、硼等合金元素贫化。碳、硼是强碳化物和金属间化合物的形成元素。贫碳、贫硼，将使合金的高温持久强度明显下降，室温塑性和韧性降低，并能引起表层晶粒粗大。采用无氧化加热可以防止贫碳，但贫硼现象仍然存在（见表 10.2-9）。为减少合金元素贫化，应避免高温长时间保温。对于合金元素贫化的锻件，为了保证零件的使用性能，贫化层必须在机加工时全部除去。



表 10.2-9　高温加热条件对合金元素贫化的影响

合金牌号	加热规范	加热设备及保护措施	贫碳层/mm	贫硼层/mm	备注
GH2135	1 160℃保温 4.5h + 1 140℃保温 4 h	电炉	1	3	W、Mo、Al、Ti、Ni、Cr、Mn、Si 等合金元素无明显贫化现象
GH4037	1 200℃保温 30min	电炉和液化石油气保护	0	0.8 ~ 1.5	
		电炉和玻璃或陶瓷涂料保护	0	1.6 ~ 1.8	
	1 190℃保温 4h + 1 050℃保温 4 h	水煤气无氧化加热炉	0	4.8	
GH4049	1 220℃保温 4 h + 1 050℃保温 4 h	水煤气无氧化加热炉	0	2	

4　铝合金塑性成形件的常见缺陷与控制措施

铝合金是以铝为基，加入了锰、镁、铜、硅、铁、镍、锌等各种元素而形成的。它密度较小，强度适宜，因而得到了愈来愈广泛的应用。

根据成分和工艺性能不同，铝合金分为变形铝合金和铸造铝合金两大类。

变形铝合金按其热处理强化能力可分为热处理不强化铝合金和热处理强化铝合金（见图 10.2-33）。

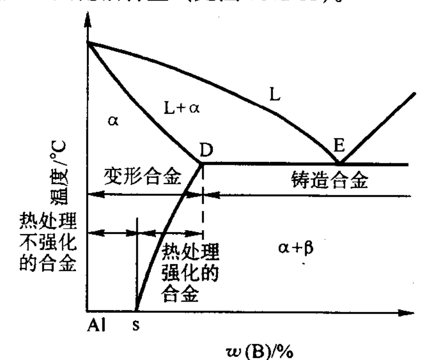


图 10.2-33　铝合金分类图

变形铝合金按其使用性能及工艺性能分为防锈铝合金、硬铝合金，超硬铝合金和锻铝合金。它们的主要牌号和成分见表 10.2-10。

表 10.2-10　变形铝合金主要牌号的化学成分及挤压棒材的力学性能

类别	牌号	化学成分（质量分数）(%)						力学性能			
		Cu	Mg	Mn	Fe	Si	其他	直径尺寸/mm	材料状态	σ_b/MPa	δ_5 /% ≥
防锈铝合金	5A02		2.0 ~ 2.8	或 Cr0.15 ~ 0.04				所有尺寸	T4 或 H112	≤226	10
	5A05		4.0 ~ 5.0	0.3 ~ 0.6		V0.02 ~ 0.10		厚 0.5 ~ 4.5	T4	270	15
	5A11 5A12		4.8 ~ 5.5 8.3 ~ 9.6	0.30 ~ 0.60 0.40 ~ 0.80		Ti 或 V0.02 ~ 0.15 Ti0.05 ~ 0.15	≤200 > 200 Sb0.004 ~ 0.05	> 200 直径 ≤150	T4，H112 T4 或 H112	270 250 373	15 10 15
	3A21			1.0 ~ 1.6				所有尺寸	T4 或 H112	≤167	20
硬铝合金	2A01	2.2 ~ 3.0	0.20 ~ 0.50					线材	T4 T4	300 160	24 24
	2A04	3.2 ~ 3.7	2.1 ~ 2.6	0.50 ~ 0.80		Ti0.05 ~ 0.40	Be 0.001 ~ 0.01	—	—	—	—
	2A11	3.8 ~ 4.8	0.40 ~ 0.80	0.40 ~ 0.80				< 160 > 160	T4	373 353	12 10
	2A12	3.8 ~ 4.9	1.2 ~ 1.8	0.30 ~ 0.90				≤22 23 ~ 160 > 160	T4	392 422 412	12 10 8
	2A13	4.0 ~ 5.0	0.30 ~ 0.50					≤22 23 ~ 160	T4	314 343	4 4
	2A16	6.0 ~ 7.0		0.40 ~ 0.80		Ti0.10 ~ 0.2		所有尺寸	T6	353	253



续表 10.2-10

类别	牌号	化学成分（质量分数）/%						力学性能			
		Cu	Mg	Mn	Fe	Si	其他	直径尺寸/mm	材料状态	σ_b/MPa	δ_5/%≥
超硬铝合金	7A04	1.4~2.0	1.8~2.8	0.20~0.60	Zn5.0~5.7			≤22 23~160 >160	T6	490 530 510	7 6 5
	7A05	0.30~1.0	1.2~2.0	0.3~0.8	0.6	0.4			—	—	—
	7A06	2.2~2.8	2.5~3.2	0.2~0.5	0.5	0.3			—	—	—
	7A09	1.2~2.0	2.0~3.0		Zn5.1~6.1			同 7A04			
锻铝合金	6A02	0.20~0.60	0.45~0.90	或 Cr0.15~0.35		0.50~1.2		所有尺寸	T6	294	12
	2A50	1.8~2.6	0.40~0.80	0.40~0.80		0.7~1.2		所有尺寸	T6	353	12
	2A70	1.9~2.5	1.4~1.8		0.90~1.5	Ti0.02~0.1	Ni0.9~1.5	所有尺寸	T6	353	8
	2A80	1.9~2.5	1.4~1.8		1.0~1.6	0.5~1.2	Ni0.9~1.5	所有尺寸	T6	353	8
	2A90	3.5~4.5	0.40~0.80		0.50~1.0	0.5~1.0	Ni1.8~2.3	所有尺寸	T6	353	10
	2A14	3.9~4.8	0.40~0.80	0.40~1.0		0.6~1.2		≤22 23~160 >160	T6	441 451 432	10 10 8

注：状态符号表示意义：O—退火；T4—淬火（自然时效）；T6—淬火（人工时效）；H112—热挤。

Cu、Mg、Zn 等是铝合金中的主要强化元素。它们一方面溶解在铝中使固溶体强化；另一方面，它们在铝合金中形成大量的化合物，成为铝合金中的强化相和过剩相（见表 10.2-11）。

表 10.2-11　铝合金中的过剩相和强化相类型

合金类别		过剩相和强化相
防锈铝	Al-Mn 系合金 Al-Mg 系合金	$(MnFe)Al_8$，$Al_{10}Mn_3Si$（T 相），α 相（AlFeSi），$FeSiAl_3$，$MnAl_6$，Mg_5Al_8（β 相），(AlFeSiMn) 相及 Mg_2Si
硬铝	Al-Cu-Mg 系合金	$CuAl_2$（θ 相），Al_2CuMg（S 相），(AlFeCuMn)
超硬铝	Al-Cu-Mg-Zn 系合金	$MgZn_2$，Al_2CuMg（S 相），$Al_2Zn_3Mg_3$（T 相）
锻铝	Al-Mg-Si 系合金 AlMgSiCu 系合金 Al-Mg-Cu-SiFe-Ni 系合金	Mg_2Si，少量 $CuAl_2$，少量 $MnAl_6$，Mg_2Si，CuAl，少量 Al_2CuMg（S 相），$CuAl_2$，Mg_2Si，Al_2CuMg（S 相），$FeNiAl_6$，AlNiCu，Al_2Cu_2Fe

铝合金中锰、铬、钛的作用主要是提高合金的再结晶温度，减弱其晶粒长大的倾向性。

镍在铝合金中可以改善合金的抗腐蚀性能和提高热强性。

Fe、Si、Na、K 等都属于铝合金中的杂质元素，其中主要是 Fe 和 Si。Fe 在铝中的溶解解度很小，在 655℃ 时为 0.5%，在室温时仅为 0.002%。Fe 主要形成金属化合物 $FeAl_3$，是硬脆的针状化合物。Si 在铝中的溶解度略大一些，在 577℃时可溶入 1.65%，在室温时为 0.05%。Si 除溶入铝中外，多余的则单独存在于铝中，通常称为“游离硅”。

铝合金中由于存在大量的强化相和过剩相，因此，其铸态组织中呈现多相混杂的状态。另外，在某些铝合金（例如 2Al2）铸态组织中还常常存在共晶混合物。这些物质通常又硬又脆，且呈网状分布于晶界。而且，由于铸造时的冷却条件，使这些化合物相在铸锭中形成了区域偏析、枝晶偏析和晶间偏析，此外，还有气孔、缩孔等缺陷，严重降低了铝合金铸锭的塑性。通过热塑性变形可以使铝合金铸态组织得到较大改善，性能得到较大提高。以 2A11 为例，经挤压变形后，形成纤维状组织，在挤压变形程度小于 70% 之前，随着变形程度的增加，材料纵向及横向的强度指标都不断提高。当变形程度继续增加时，纵向性能继续提高，而横向性能急剧下降，即引起了性能的异向性。

流线的分布情况对铝合金的性能有很大影响，流线不顺、涡流和穿流都使铝合金的塑性指标、疲劳强度和抗腐蚀性能有明显降低。因此，编制成形工艺时，应当使流线方向与零件最大受力方向一致。

某些热处理可以强化的变形铝合金，按照一定的规范热变形之后，可以使变形强化的效果保存下来，使合金的强度提高，即所谓热形变强化效应，这是因为，按照一定的规范热变形之后，某些合金的再结晶温度高于淬火加热温度，所以热处理后的制品具有未再结晶组织。这种组织的晶粒细小，并且晶粒中形成许多亚晶块，故强度性能远远高于再结晶组织的制品。

影响铝合金再结晶温度的主要因素有：合金成分、压力加工前的均匀化规范、压力加工方式（应力状态）、变形温度、变形速度、变形程度和最终热处理制度等。图 10.2-34 是 2A14 合金的组织状态与变形温度和变形速度的关系。

铝合金的晶粒尺寸对力学性能有较大影响，铝合金锻件中的粗晶显著降低强度极限和屈服极限，降低零件的使用性能和寿命。因此，锻造铝合金时需注意控制晶粒度。铝合金锻件的晶粒大小与变形温度、变形程度、受剪切变形的情况以及固溶处理前的组织状态等有关。

供锻造和模锻的铝合金原坯料，一般采用铸锭和挤压坯料，个别情况下亦采用轧制坯料。

铸锭坯料往往具有疏松、气孔、缩孔、裂纹、成层、夹渣、氧化膜和树枝状偏析等缺陷。

挤压坯料一般具有粗晶环、成层、缩尾、夹渣、氧化膜和表皮气泡等缺陷。

铝合金坯料的上述缺陷，不仅锻造时容易开裂，而且直接影响到锻件质量，所以锻前需要按标准对坯料进行检查，合格后方能投产。

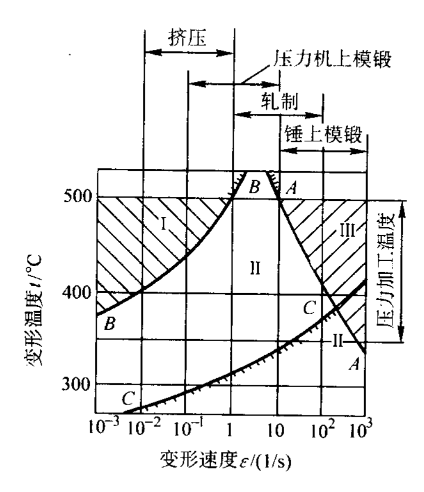


图 10.2-34 淬火后的 2A14 合金的组织状态与变形温度和变形速度的关系

Ⅰ—不存在再结晶；Ⅱ—完全再结晶；Ⅲ—变形后就开始了再结晶，其余为混合组织

铝合金的锻造特点如下。

1）塑性较低。铝合金的塑性受合金成分和锻造温度的影响较大。大多数铝合金对变形速度不十分敏感，但是随着合金中合金元素含量的增加，合金的塑性不断下降，对变形速度的敏感性逐渐增加（图 10.2-35），由图还可以看出，当变形温度较低时，铝合金的塑性急剧下降，特别是高强度铝合金（7A04 等）表现最为突出。

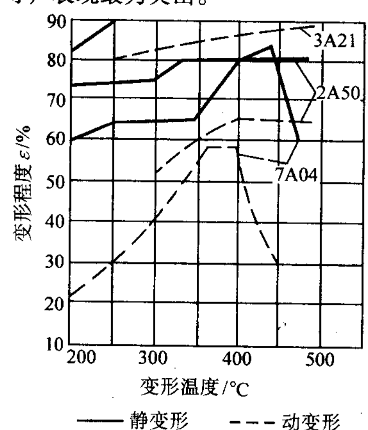


图 10.2-35 不同变形温度和速度对铝合金塑性的影响

2）流动性差。铝合金质地很软，外摩擦系数较大（表 10.2-12），所以流动性较差，模锻时难于成形。

表 10.2-12 铁碳合金与铝合金变形时的外摩擦系数

合金		铁碳合金/%		铝合金/%	
变形速度/（m/s）		<1	>1①	<1	>1
变形温度/℃	（0.8～0.95）$T_{熔}$②	0.40	0.35	0.50	0.48
	（0.5～0.8）$T_{熔}$	0.45	0.40	0.48	0.45

注：若采用润滑剂摩擦系数可降低 15%～25%。

① 锤击作用也适用。

② $T_{熔}$ 是指绝对熔化温度。

3）锻造温度范围窄。铝合金的锻造温度范围一般都在 150℃以内，少数高强度铝合金的锻造温度范围甚至不到 100℃；由于铝合金的锻造温度范围很窄，所以一般都采用能精确控制加热温度的带强制循环空气的箱式电阻炉或普通箱式电阻炉进行加热，温差控制在 ±10℃以内。同时，为了保证适当的终锻温度，提高合金的塑性和流动性，改善合金的成形条件，用于锻造和模锻的工具或模具需要预热。

4）导热性良好。铝合金由于导热性好，加热时内应力小，且易于均匀热透，所以坯料可以直接装入接近始锻温度的高温炉膛内进行快速加热。挤压坯料在不产生锻造裂纹的条件下，不必进行保温，但铸造坯料加热时需要保温。

5）始锻温度和终锻温度要严加控制。始锻温度一般取上限，这样有利于提高合金的塑性和流动性，使金属易于成形。但有些合金始锻温度太高，将引起强度下降。例如，2A14 合金始锻温度高于 470℃时，强度约下降 24 MPa；5A06 合金始锻温度从 360℃提高到 420℃，强度约下降 15 MPa。终锻温度高有利于保持挤压坯料的挤压效应，能得到具有未再结晶组织和力学性能高的锻件。终锻温度过低，容易产生大晶粒，使锻件的力学性能大大降低。同时，终锻温度过低，使合金的塑性和流动性急剧下降，容易产生表面和内部裂纹。

锻造过程中常见的缺陷与控制措施如下。

（1）过烧

由于铝合金的温度范围窄，其锻造加热温度，尤其是淬火加热温度很接近合金的共晶熔化温度，容易发生过烧。所以在锻件和模具加热以及锻件淬火加热时，必须十分注意温度上限，严格遵守工艺操作规程，否则会引起锻件过烧。锻件过烧后，表面发暗、起泡，一锻就裂。在热处理时产生的过烧，也可能形成裂纹。过烧锻件的高倍组织特点是：晶界发毛、加粗，出现低熔点化合物的共晶复熔球，形成三角晶界。轻微过烧的锻件，强度稍有提高，但疲劳性能较差。严重过烧后各项性能急剧下降，使锻件成为废品。

（2）裂纹

由于铝合金的塑性和流动性较差，很容易产生表面和内部裂纹。产生表面裂纹的原因与坯料种类有关。用铸锭做坯料，往往由于铸锭含氢量高、有严重的疏松、氧化夹渣、粗大的柱状晶、存在有严重的内部偏析、高温均匀化处理不充分以及铸锭表面缺陷（凹坑、划痕、棱角等）都会在锻造时产生表面裂纹。另外，坯料加热不充分，保温时间不够、锻造温度过高或过低，变形程度太大，变形速度太高、锻造过程中产生的弯曲、折叠没有及时消除，再次进行锻造，都可能产生表面裂纹。

挤压坯料表面的粗晶环、表皮气泡等，也容易在锻造时产生开裂。

铝合金锻件的内部裂纹，主要是由于坯料内部存在有粗大的氧化物夹渣和低熔点脆性化合物，变形时在拉应力或切应力的作用下产生开裂，并不断扩大。此外，锻造时多次滚圆，当每次变形量较小（小于 15%～20%）时，也会产生内部中心裂纹。

由于铝合金的锻造温度范围很窄，如果锻造工具和模具没有预热，或预热温度不够也会引起锻件产生裂纹。

因此，要防止产生表面和内部裂纹，必须采取如下措施：

1）选择高质量的原坯料，坯料表面的各种缺陷要彻底清除干净。例如，挤压坯料常常需要车皮。在锤上锻造不便于车皮的小棒料时，开始要轻击，打碎粗晶环，然后逐渐加重打击。

2）铸锭坯料要进行充分的高温均匀化处理，消除残余内应力和晶内偏析，以提高金属塑性。锻造加热时，要保证在规定的加热温度进行加热并充分保温。

3）根据不同合金，选择最佳锻造温度范围。例如，7A04 合金铸锭的最佳锻造温度范围为：在 440℃左右加热保温，然后缓冷至 410～390℃左右锻造，塑性最好。

4）铝合金由于流动性差，不宜采用变形激烈的锻造工序（如滚压），并且变形程度要适当，变形速度要越低越好。

5）锻造操作时要注意防止弯曲、压折，并要及时矫正或消除所产生的缺陷。滚圆时，压下量不能小于 20%，并且滚圆的次数不能太多。



6）用于锻造和模锻的工具，要充分预热，加热温度最好接近锻造温度，一般为 200～420℃，以便提高金属的塑性和流动性。

（3）大晶粒

锻铝（6A02、2A50、2A70、2A14、2024、2068）和硬铝（2A11、2A12 等）很容易产生大晶粒，它们主要分布在锻件变形程度小而尺寸较厚的部位，变形程度大和变形激烈的区域以及飞边区附近。另外，在锻件的表面也常常有一层粗晶。产生大晶粒的原因除了由于变形程度过小（落入临界变形区）或变形程度过大和变形激烈不均匀所引起之外，加热和模锻次数过多，加热温度过高（例如 6A02 合金淬火温度过高，保温时间过长，常常出现大晶粒），终锻温度太低也会产生大晶粒。锻件表面层的粗晶，其产生原因有两种情况：其一，是挤压坯料表层粗晶环被带入锻件；其二，是模锻时模膛表面太粗糙，模具温度较低，润滑不良，使表面接触层激烈剪切变形，因而产生粗晶。

所以，为避免铝合金锻件产生大晶粒，应注意以下问题：

1）必须改进模具设计，合理选择坯料，保证锻件均匀变形。

2）避免在高温下长时间加热，对 6A02 等容易晶粒长大的合金，淬火加热温度取下限。

3）减少模锻次数，力求一火锻成。

4）保证终锻温度。

5）改善模膛表面粗糙度达到 $R_a0.4\ \mu m$ 以下，采用良好的工艺润滑剂。

解决铝合金大晶粒的有效措施是采用等温模锻工艺，即将模具加热至（并保持）接近合金的实际变形温度，在液压机慢速的条件下成形。在合适的变形温度和变形程度条件下，可保证模锻后获得完全再结晶的组织，经固溶处理后可得到细小晶粒。例如某厂的飞机起落架等锻件，原先是在无砧座锤上模锻成形，经常出现大晶粒，造成锻件报废，后改用等温模锻工艺，较好地解决了这一问题。

（4）折叠和流线不顺（包括涡流、穿流）

1）折叠是造成铝合金模锻件废品的一个主要缺陷。锻件的折叠废品约占整个废品率的 70%～80% 以上。它是由于模锻时金属对流，形成某些金属的重叠，最后压合而成为折叠。这类废品，以工字形断面的锻件最为严重，并且不易消除。产生折叠的主要原因，可归纳如下。

① 锻件设计时，腹板与筋交角处的连接半径太小，筋太窄太高，腹板太薄，筋间距太大。另外，锻件各断面形状和大小变化太剧烈，难于选择坯料，使金属流动复杂。

② 坯料太大或太小，且形状不合理，使金属分配不当。

③ 形状复杂的锻件，没有制坯和预锻模，或者制坯和预锻模膛设计不合理，与终锻模膛配合不当，局部金属过多或过少。

④ 工艺操作不注意，放料不正，润滑剂太多或润滑不均，加压速度太快，一次压下量太大。

⑤ 供模锻用的自由锻坯棱角太尖，或每次修伤不彻底，模锻后就会发展成折叠。

2）流线不顺、涡流和穿流。其形成原因与折叠基本相同，也是由金属对流或流向紊乱造成，只不过有的部位尽管存在有流线不顺和涡流现象，但未能发展成折叠那样严重的程度。穿流和涡流能明显降低塑性指标、疲劳性能和抗腐蚀性能。

为了防止铝合金锻件产生折叠、流线不顺、涡流、穿流和晶粒大小不均匀等缺陷，必须采用如下措施。

① 设计锻件图时，筋不能太高太窄，筋间距不能太大，腹板不能太薄，筋与腹板连接的圆角半径不能太小，锻件各断面的变化要尽量平缓。

② 对于形状复杂和具有工字形断面的锻件，应采用多套模具，多次模锻，使坯料由简单的形状逐步过渡到复杂的锻件，以保证金属流动均匀，充填容易，纤维连续。

但是，在设计预锻模膛和制坯模膛时，必须减小筋的高度，增加腹板厚度，增加筋与腹板的连接半径，并使制坯模膛的各断面积等于或稍小于锻件各相应的断面积。根据终锻时模锻的情况，来调整在制坯模中模锻时的欠压量，或重新修整制坯模。

图 10.2-36 是工字形断面三角架锻件的终锻件，预锻件和制坯件的横断面的低倍照片。该锻件是采用三套模具（制坯模、预锻模、终锻模）逐步模锻成的。制坯模、预锻模、终锻模的各断面积分别相差 15% 左右，初锻、预锻时的欠压量均严格控制在 1 mm 左右。从图 10.2-36 可以看到，锻件流线分布合理，晶粒大小均匀，没有折叠缺陷。

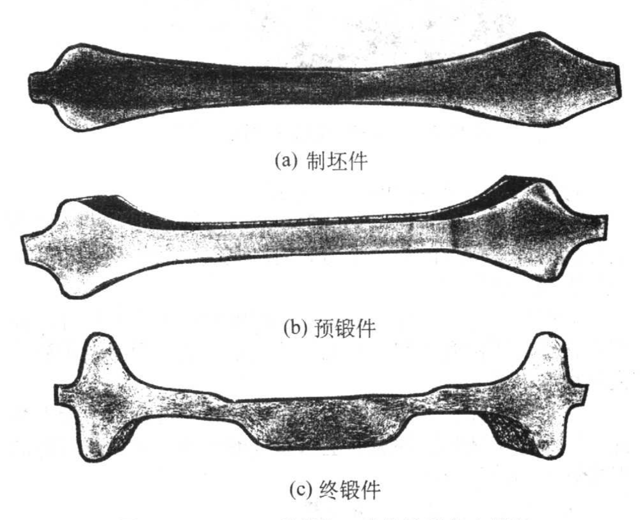


图 10.2-36　2A50 锻件各工步的流线分布情况

③ 编制工艺时，要注意坯料计算，不能过大或过小。对断面变化较大的锻件，如果没有制坯模，则需用自由锻制坯，使坯料各断面的金属量分配合理，以防止金属变形不均，流动紊乱。

④ 工艺操作时，放料要正、加压要慢，涂抹润滑剂要均匀，并且要按工艺严格控制欠压量。对于制坯和预锻，要尽量压靠，使欠压为零。

⑤ 对于具有通孔和废料仓的锻件，每次模锻后应进行冲孔，以利于容纳多余的金属。

⑥ 改变锻件的分模面，采用反挤成形，金属流动条件好，锻件组织结构均匀，成品率高。例如，对于图 10.2-37a、b 形状的断面，最好改变成图 10.2-37c、d 的形式。

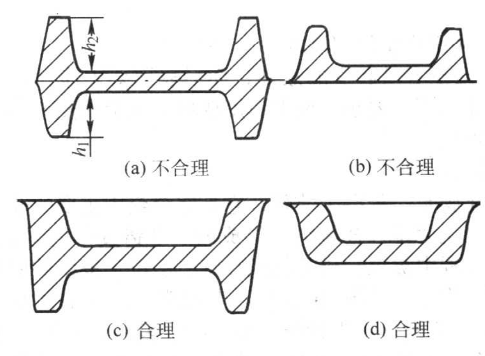


图 10.2-37　铝合金锻件分模面选取原则

⑦ 要注意锻件修伤，每次模锻后，必须仔细检查，把各种缺陷清除干净，以防止进一步模锻时缺陷扩展，使锻件报废。

(5) 气泡

在铝合金锻件表面，有时出现气泡（图 10.2-38），其产生原因为：

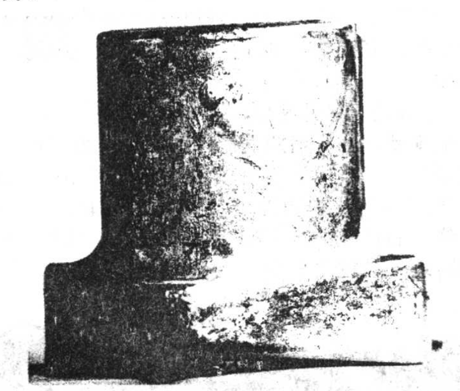


图 10.2-38　2A50 模锻件表面上的气泡

1) 由挤压坯料表面气泡带来的。

2) 在高温下加热（热处理或锻造加热跑温）时，铝合金特别是含镁量高的铝合金与炉内水蒸气发生作用，容易在锻件表面产生气泡。

火焰炉的炉气中存在的硫、或在电炉中加热时锻件表面带有含硫的残留润滑剂，都能促使气泡形成，但是电炉要比火焰炉好得多。

在热处理前，将锻件先阳极氧化或在锻件表面上涂上牛油，均有助于减缓锻件表面上水蒸气的作用，从而使气泡的形成减少到最低限度。

(6) 粘模、起皮和表面粗糙

铝合金因质地很软，外摩擦系数大，最容易粘模，这不仅会引起锻件起皮，使锻件表面粗糙，有时甚至因不能脱模而中断生产。

起皮，即在锻件表面呈薄片状起层或脱落。其主要是由模膛表面粗糙、变形过于激烈、变形速度太快、变形温度太高、变形量太大，模锻时没有润滑或润滑不良等造成的。此外，铸锭表面不干净（有水、油污、毛刺），挤压坯料表面有气泡，也能促成在模锻或锻造时产生起皮。

锻件表面粗糙，即锻件表面凹凸不平，呈麻面状。其产生主要原因是由于模膛表面不光滑，润滑剂不干净或燃点太高，涂抹过多、模锻时未完全挥发，残存在锻件表面上，蚀洗后在锻件表面上显现出不同的蚀洗深度。

为了消除粘模、起皮和表面粗糙，必须采取如下措施：

1) 提高模具硬度，并保证模膛表面粗糙度要低于 $R_a0.2\ \mu m$。

2) 采用优质的润滑剂。

3) 对于容易起皮的锻件，坯料表面要干净，变形温度要低，变形程度要小，变形速度要慢，避免激烈变形，并且要适当地均匀润滑。

(7) 氧化膜

氧化膜是一种冶金缺陷，它是铝合金中主要的非金属夹杂物。氧化膜是合金熔铸时形成的。在铸锭中它呈颗粒状，在变形过程中被拉长成条状或片状，多位于模锻件的腹板上和分模面附近（见图 10.2-39）。其显微组织呈涡纹状（见图 10.2-40）。其断口组织特征可分两类：其一，在断口表面呈平整的片状（见图 10.2-41），颜色从银灰色、浅黄色直至褐色、暗褐色，称为片状氧化膜；其二，在断口表面呈细小密集而带闪光的点状物，叫小亮点氧化膜。

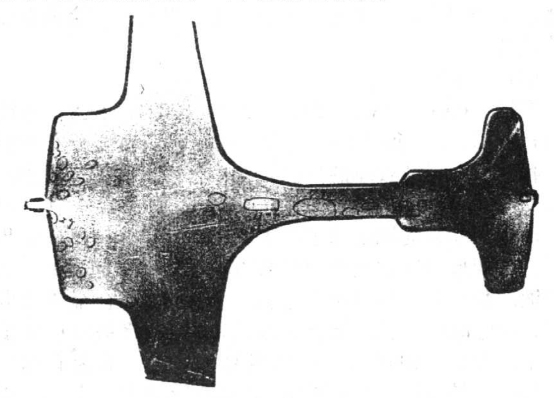


图 10.2-39　2A50 合金锻件低倍组织上的氧化膜



图 10.2-40　氧化膜处的显微组织（呈涡纹状）　70×

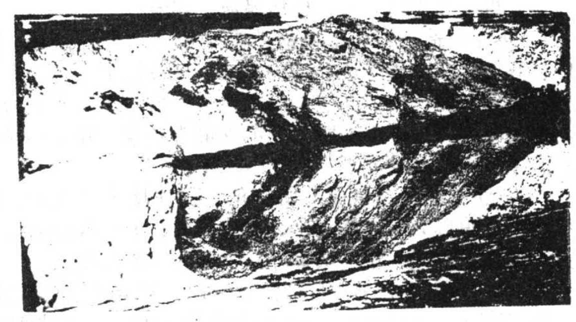


图 10.2-41　断口上呈片状的氧化膜　9×

锻件和模锻件中的氧化膜，对纵向性能无明显影响，但对高度方向的性能影响较大，它降低了高度方向的强度性能，特别是高度方向的伸长率、冲击性能和抗腐蚀性能（见表 10.2-13）。

表 10.2-13　有氧化膜的 2A50 铝合金锻件性能试验结果

高度方向力学性能验试项目	性能要求	试样编号			
		1	2	3	4
抗拉强度 σ_b/MPa	≥360	361	360	322	331
屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	≥280	241	244	253	248
伸长率 δ/%	≥15	4	4	8	6
硬度 HBS	≥120	118	118	121	120

防止氧化膜的对策是从熔炼和浇铸方面采取措施，主要如下：



1）熔铸时采用最有效的过滤系统；

2）提高精炼温度，彻底精炼熔体；

3）保证熔体的静置时间；

4）提高浇铸温度；

5）建立良好的转注条件，避免液流的翻滚波动，使液流在表层氧化膜的覆盖下平稳地流动；

6）充分地烘烤铸造工具，并要防止操作不慎，通过铸造工具把氧化膜带入金属液内；

7）尽可能缩短转注距离（流槽长度），减少液体裸露在大气中的时间。

（8）残留铸造组织

锻造大型锻件时，如果所用的铸锭在自由锻制坯时变形不充分，或者使用挤压变形程度不够的棒材作毛坯，则模锻后，锻件内很可能有铸造组织残留。残留铸造组织的锻件，延伸率往往不合格，断口呈粗大晶粒，高倍观察时，呈骨骼状或枝晶网状组织。

为避免铸造组织残留，模锻前的毛坯需经过充分变形；在模锻件上取样时，应当在难变形区或不充分变形区取样，也可考虑在零件的重要受力区取样。

5　镁合金塑性成形件的常见缺陷与控制措施

镁合金的密度小、比强度高、弹性模量低、具有良好的抗振性及切削加工性能，所以，通常用来制造重量轻、强度高和抗疲劳的零件，在航空工业中得到了一定的应用。

镁合金根据其成分和工艺性能分为变形镁合金和铸造镁合金两大类。

变形镁合金主要分为 Mg-Mn 系、Mg-Al-Zn 系、Mg-Zn-Zr 系和 Mg-Mn-Ce 系四类。常用变形镁合金的化学成分见表 10.2-14。

表 10.2-14　变形镁合金的化学成分

组别	牌号	系别	基本成分（质量分数）/%						杂质不大于（质量分数）/%								应用	塑性
			铝	锰	锌	铈	锆	镁	铝	铜	镍	锌	硅	铍	铁	其他		
Ⅰ	M2M	Mg-Mn		1.3～2.5				余量	0.3	0.05	0.01	0.3	0.15	0.02	0.05	0.2	焊接结构板材、棒材、模锻件、低强度构件	高
	ME20M			1.5～2.5		0.15～0.35			0.3	0.05	0.01	0.3	0.15	0.02	0.05	0.3	板材、模锻件、型材、管材	高
Ⅱ	AZ40M	Mg-Al-Zn	3.0～4.0	0.15～0.5	0.2～0.8					0.05	0.005		0.15	0.02	0.05	0.3	形状复杂的锻件，模锻件	中
	AZ41M		3.5～4.5	0.3～0.6	0.8～1.4					0.05	0.005		0.15	0.02	0.05	0.03	板材、模锻件	中
	AZ61M		5.5～7.0	0.15～0.5	0.5～1.5					0.05	0.005		0.15	0.02	0.05	0.3	条材、棒材、锻件、模锻件	中下
	AZ62M		5.0～7.0	0.20～0.5	2.0～3.0					0.05	0.005		0.15	0.02	0.05	0.3	棒材	中
	AZ80M		7.0～9.2	0.15～0.5	0.22～0.8					0.05	0.005		0.15	0.02	0.05	0.3	棒材、锻件、模锻件、高强度构件	低
Ⅲ	ZK61M	Mg-Zn-Zr			5.0～6.0		0.32～0.9			0.05	0.005	锰 0.1	0.05	0.02	0.05	0.3	棒材、型材、条材、锻件、模锻件、高强度构件	中
Ⅳ	MB14	Mg-Mn-Ce		1.4～2.2		2.5～3.5					0.01	0.2	0.2	0.01			棒材、模锻件、200℃以下工作的耐热镁合金	中

镁合金中加入 Al、Zn、Ce 等合金元素后，它们和镁形成了硬脆的化合物。铸锭结晶时，它们呈断续或连续的网状物在 α 晶粒的晶界上析出。具有这种组织的合金，其塑性是很低的。为此，镁合金铸锭在挤压或锻造之前需进行均匀化退火。经高温均匀化后，原来分布在晶内和晶界上粗大的化合物发生溶解而使显微组织趋于均匀。表 10.2-15 为 AZ61M 合金铸锭经均匀化处理后的力学性能。由表 10.2-15 可以看出，经均匀化退火处理后由于合金的组织有了较大改善，合金的性能也随之有了较大提高。

热塑性变形可使镁合金的铸态组织得到较大改善，性能得到较大提高。表 10.2-16 列出了 AZ61M 合金铸态与挤压棒材的力学性能。由表中数据可见，经挤压后合金的强度和塑性指标均有提高。挤压变形程度愈大，效果愈明显，尤其是塑性指标，提高较显著。



表 10.2-15　AZ61M 铸锭均匀化处理后的性能

处理范围	σ_b/MPa	δ/%
未处理试件	188.5	5.4
350℃保温 12 h	205	6.7
350℃保温 24 h	221	7.8

表 10.2-16　AZ61M 铸态与挤压棒材的力学性能

合金状态		σ_b/MPa	δ/%
铸造		226	8.7
挤压（变形程度%）	65	232	6.8
	80	269	5.9
	90	285	10.1
	98	292	29.2

镁合金经挤压后力学性能也出现了异向性。它一方面是由于在挤压棒材中形成了纤维组织；另一方面是由于镁合金是具有密排六方晶格的金属，在挤压过程中，随着变形程度增大，密排六方晶格的基面逐步转向与挤压方向重合造成的。图 10.2-42 为 AZ61M 挤压毛坯强度极限的异向性随变形程度变化的规律。挤压变形程度为 50%～70%时，异向性最明显。形程度增大时，异向性逐渐减小。

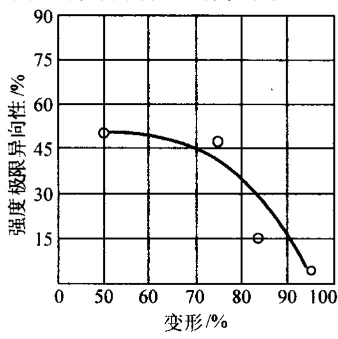


图 10.2-42　AZ61M 合金挤压毛坯强度极限的异向性随变形程度而变化的曲线

为减小挤压毛坯的异向性，除增大挤压时的变形程度外，挤压前将铸锭均匀化退火，减轻铸锭中的偏析程度，也有一定效果。

应当指出，挤压后的镁合金棒材沿横截面上的性能也是不均匀的。无论是纵向或横向，外层的力学性能都高于轴心区。这是由于挤压时外层金属受到的剪切变形大，晶间物质和晶内破碎都较大，因此，挤压变形和再结晶后能获得比轴心区较好的性能。

镁合金铸锭经锻造后的力学性能变化与挤压略有不同，图 10.2-43 为 AZ40M 合金在压力机上锻造时力学性能随变形程度变化的情况。当变形程度小于 90%时，顺纤维方向和横纤维方向的强度指标都随变形程度增加而增大。而且当变形程度大于 70%时，横向强度指标比纵向的提高得快。但是，变形程度超过 60%以后，横向塑性指标 δ 则逐渐降低。

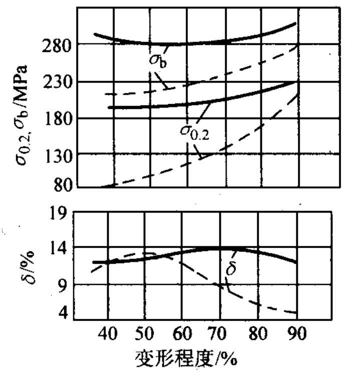


图 10.2-43　AZ40M 合金在压力机上锻造时力学性能随变形程度而变化的曲线

实线—顺纤维方向；虚线—横纤维方向

具有力学性能异向性的挤压棒材在压力机上横向压缩后，其异向性将减小。而且变形程度愈大，纵、横向的异向性愈小。但是，沿高度（厚度）方向的性能将降低，这是由于此时金属沿宽度方向流动，又形成了新的流线所致。

将挤压毛坯再进行镦粗后，由于晶粒又受到较大变形，晶界物质被破碎和分散，合金的性能将会有进一步提高。例如，将 AZ40M 合金铸锭先进行挤压变形（变形程度为 82%），然后将其中一部分再加热到 360～380℃在水压机上镦粗（压缩程度为 82%），并从挤压坯料和挤压后又镦粗的坯料中分别取出试件作冲击试验，其性能变化曲线见图 10.2-44。由图可见，坯料两次变形（挤压后又镦粗）后冲击韧度较一次变形的要高得多。

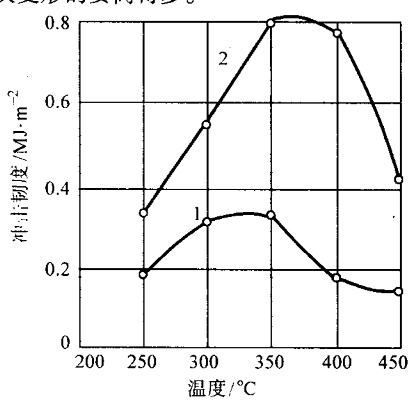


图 10.2-44　AZ40M 合金毛坯的冲击韧度随变形温度而变化的曲线

1—从挤压毛坯中取得的试样；
2—从挤压后又经过自由锻的毛坯中取得的试样

镁合金的晶粒尺寸对力学性能有较大影响。因此，锻造镁合金时需要控制晶粒度。镁合金锻件的晶粒大小与变形程度、变形温度及变形速度有关。该关系可由镁合金的再结晶图反映出来。各种镁合金的再结晶倾向是不一样的。图 10.2-45 为 AZ61M 合金的再结晶图。当温度达 300℃时再结晶过程才开始，当温度超过 350℃时，不管变形程度多大，晶粒均显著长大。这一方面是由于变形程度大时再结晶容易进行，在高温下再结晶的晶粒容易长大；另一方面是变形程度大时热效应大，使锻件温度升高，加速了晶粒的长大。当变形程度在临界变形范围时，将形成粗大晶粒。AZ61M 在压力机上的临界变形程度不超过 10%。

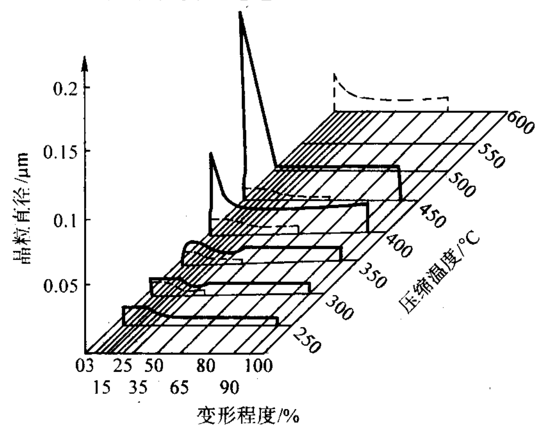


图 10.2-45　AZ61M 合金再结晶图

实线—静变形；虚线—动变形



表 10.2-17 列出了几种镁合金在水压机和锤上变形时的恢复和再结晶温度。在锤上锻造时，由于变形速度较大，抑制了软化过程，和静变形相比，需要在较高的温度下，再结晶才能进行。

表 10.2-17　镁合金在压力机和锤上变形时的恢复和再结晶温度

设备 / 合金 / 温度/℃	在水压机上锻造				在锤上锻造	
	AZ40M	AZ61M	AZ20M	AZ61M	AZ40M	AZ61M
恢复开始	200	200	—	250	400	400
再结晶开始	300 ~ 350	300 ~ 350	325 ~ 350	425	600	600

Mg-Al-Zn 系合金在锻造温度下晶粒长大的倾向较大，为了使其细化，应在较低的温度下结束锻造。

供锻造和模锻的坯料，一般为挤压坯料，这种坯料往往存在有氧化膜、缩尾、成层、夹渣、化合物和粗晶环等缺陷。投产前，必须按标准检查，合格后方能生产。

镁合金的锻造特点如下。

1）塑性很低。由于镁合金具有密排六方晶格，是一种塑性很低的合金。所以，用于锻造和模锻的坯料，一般是经过预先挤压的坯料，很少采用铸造坯料。

镁合金的塑性，随着其合金化程度的增加而不断下降。大多数镁合金对变形速度很敏感，随着变形速度的增加，其塑性急剧下降。在锤上变形时，大多数镁合金的允许变形程度不超过 30% ~ 50%；而在水压机上变形时，镁合金的塑性显著增加，变形程度可达 70% ~ 90%。只有低合金化的镁合金 M2M、ME20M 对变形速度不太敏感，它们既可以在压力机上变形，也可在锤上进行良好地加工。图 10.2-46 示出了三种不同镁合金的最大压缩率随温度变化的关系。

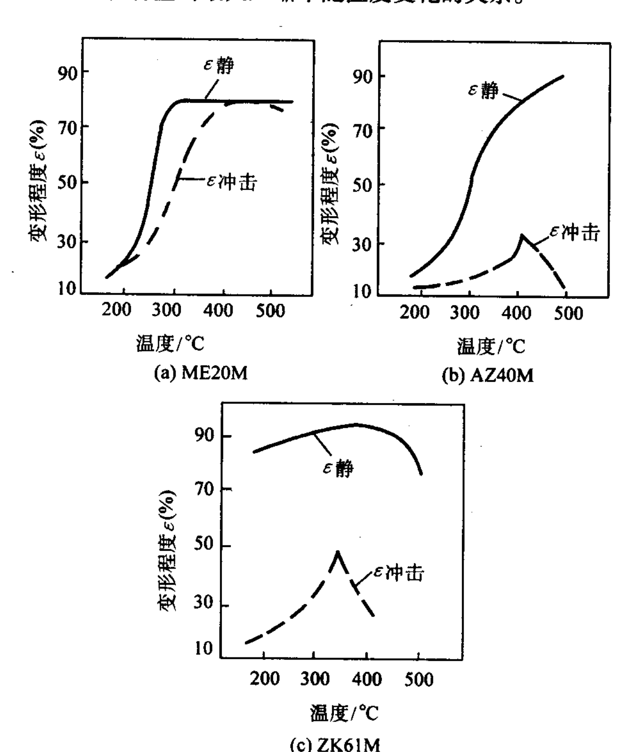


图 10.2-46　三种不同镁合金的最大压缩率随温度变化的曲线

2）流动性差。镁合金的黏性很大，流动性比铝还差，模锻时难于成形，采用激烈的变形工序，容易锻裂。

3）锻造温度范围窄，加热时容易燃烧。由于镁合金的塑性对变形温度、变形速度及应力状态等变形条件十分敏感，它的锻造温度范围比铝合金还要窄，一般在 70 ~ 150℃之间。

由于镁合金锻造温度范围窄，一般都在箱式电阻炉中加热，温差控制在 ± 10℃之内。

由于镁合金极易燃烧，因此，加热时要把坯料表面的镁屑、毛刺、油污清除干净。坯料装炉时要注意不与电阻丝接触，否则容易着火。

4）加热过程中容易产生合金软化。镁合金加热温度过高，保温时间过长，就会产生大晶粒，造成合金软化，使锻件的力学性能降低。因此，必需严格控制加热温度和保温时间。

5）导热性好。镁合金热导率高，加热时内应力小，易于均匀热透。同时，由于加热时没有相变发生，所以，可以进行快速加热，可以直接在始锻温度下装炉。

锻造过程中常见的缺陷与控制措施如下。

(1) 裂纹

镁合金由于塑性低、流动性差、抗剪强度低，对缺口十分敏感，所以很容易产生锻裂，特别是在锤上锻造和模锻时，由于变形速度快，变形过程中合金再结晶温度高，使金属产生加工硬化，塑性进一步降低，更易锻裂。而在水压机上锻造和模锻时，由于变形速度慢，变形过程中合金再结晶温度低，来得及恢复和再结晶，使塑性得到恢复，裂纹缺陷大大减少。

为了防止镁合金在锻造时产生裂纹，必须采取如下对策：

1）由于镁合金对变形速度很敏感，应该尽可能在低速压力机上进行变形。但是，当不具备压力机而必须在锤上锻造时，开始要轻击，每次锤击的变形程度应不超过 5%，以保证再结晶较好的进行。随着金属不断充满模膛，再逐步加重打击。

2）在不影响性能要求的条件下，要选择尽可能高的开锻温度。例如，AZ40M 镁合金棒材坯料在水压机上镦粗时，当变形温度低于 420℃，特别是低于 400℃时，几乎 90% 以上都产生了裂纹。但是，当开锻温度高于 420℃时就能有效地避免裂纹。

3）锻造和模锻前工具必须进行预热，预热温度为 250 ~ 400℃左右。

4）锻造和模锻的工具表面要光滑，模膛表面的粗糙度应低于 R_a 0.4 ~ 0.1，并需采用良好的工艺润滑剂。

5）应尽可能地采用三向压应力状态，例如采用型砧锻造或在闭式模具中进行模锻。

(2) 折叠、起皮

镁合金在热态下具有很大的外摩擦系数，其塑性和流动性比铝合金还差，加之变形温度范围很窄，有的合金甚至只有几十度。这些特点，不仅使镁合金锻件容易卡模，难于起料，而且很容易产生起皮、折叠，对于薄板带筋、冷却很快的模锻件尤为突出。在锤上模锻比在压力机上模锻更容易产生这类缺陷。

为了消除这类缺陷，应该采取如下对策。

1）设计锻件时，筋顶与筋根的圆角半径要尽可能大一些，筋和膜板要适当加厚，筋间距不能太大。同时，在选择分模面时，尽可能选取有利于金属流动的反挤成形的分模面，例如 ZK61M 框架模锻件，模锻时常产生折叠（见图 10.2-47、图 10.2-48），当由压入成形改为反挤成形后，折叠就避免了（见图 10.2-49）。

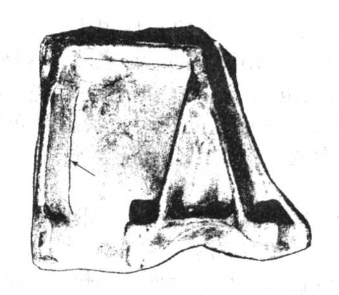


图 10.2-47　有折叠的 ZK61M 合金框架模锻件的外形（箭头所指）

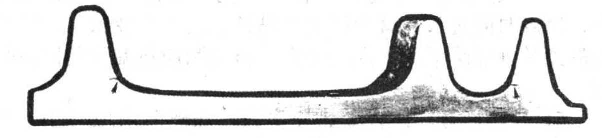


图 10.2-48　横向低倍

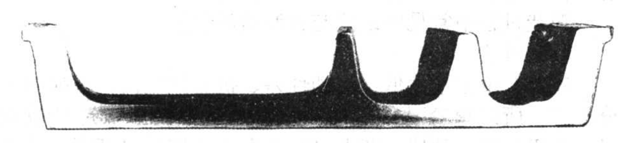


图 10.2-49　改变分模面后的横向低倍组织（由压入成形改为反挤成形）

2）制造模具时，模膛的研磨抛光方向最好与模锻过程中金属流动的方向一致，并且抛光的表面粗糙度应尽可能低于 $R_a0.1\ \mu m$。

3）在工艺上为了防止产生折叠、穿流等缺陷，应该选择大小适当、形状合理的坯料，对于形状复杂的锻件，应采用多套模具逐步成形的工艺。

4）在工艺操作上应注意正确放料，均匀润滑，缓慢加压。

5）每次模锻后要彻底修伤，清除表面缺陷，应采用大的圆弧过渡。

6）对于容易起皮的锻件，其防止措施与铝合金锻件相同。

（3）飞边裂纹

镁合金锻件最容易产生飞边裂纹。这是由于镁合金在低于 220℃以下塑性很差，而高温时质地又很软，黏性很大，因此低温切边时容易拉裂，高温切边时容易拉伤。一般推荐在 220～300℃之间热切。即便如此，也常常会产生飞边裂纹。因为镁合金抗剪强度低，对缺口十分敏感，切边时产生的微裂或缺陷，矫正时就会发展成大的裂纹。所以镁合金锻件不宜于采用模具切边，而应采用带锯切边或铣边，有些工厂采用咬合式模具切边（图 10.2-50）效果也很好。

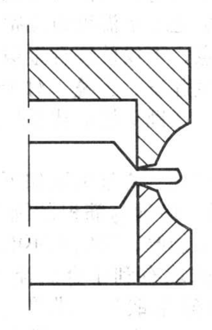


图 10.2-50　咬合式切边模示意图

（4）力学性能偏低

镁合金锻件经常出现力学性能偏低或达不到技术条件要求。这除了可能由于变形程度不够，坯料选择不合理之外，经常是由加热时间太长，加热次数太多和变形温度太高所引起。

镁合金加热和变形温度过高，加热时间过长，加热次数过多，均引起力学性能降低。图 10.2-51 和图 10.2-52 为变形温度对 AZ61M 和 AZ40M 合金力学性能的影响。由该图可见，变形温度过高时将使锻件力学性能降低，这是因为变形温度过高时，晶粒将显著长大。由于镁合金无同素异构转变，长大后的晶粒用热处理方法不能使其细化，因而锻件力学性能下降。图 10.2-53 为变形温度和加热次数对 AZ40M 合金硬度的影响。该图表明，加热次数愈多，在高温下停留时间愈长，再结晶愈充分，则镁合金愈易软化。表 10.2-18 列出了镁合金在不同温度下允许的最长保温时间，如果加热时间超过该表所列数据，就会使锻件的力学性能大大降低。若在 420～450℃保温时间超过 4 h，AZ40M、AZ61M 和 AZ80M 等合金的强度极限和屈服极限将显著降低。因此，为了获得较高的力学性能，应该严格控制始锻温度、加热时间和加热次数。

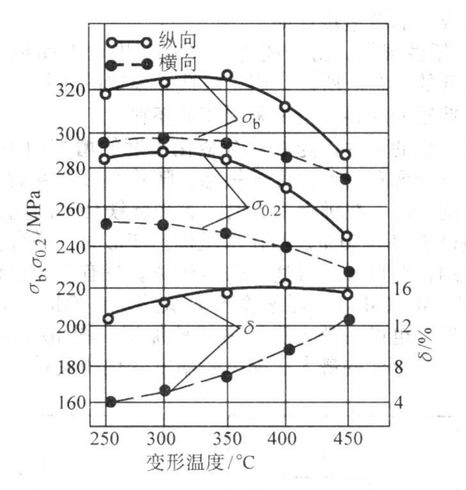


图 10.2-51　锤上模锻时变形温度对 AZ61M 合金力学性能的影响

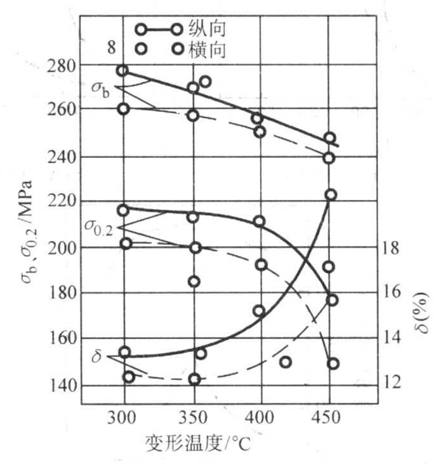


图 10.2-52　锤上模锻时变形温度对 AZ40M 合金力学性能的影响

在不产生裂纹的情况下，始锻温度和终锻温度越低越好。如果是两次或多次模锻，还要注意依次降低其终锻温度，后一次模锻比前一次模锻要降低 15℃左右。

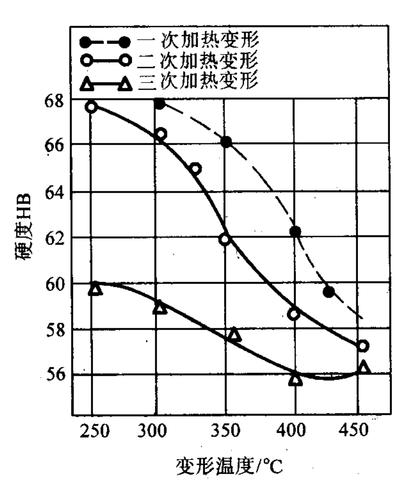


图 10.2-53 变形温度、加热（或模锻）次数对 MB2 硬度的影响

表 10.2-18 镁合金在不同温度下允许的最长保温时间

合金	温度/℃	保温时间/h	温度/℃	保温时间/h
MW61M	400	5	450	3
AZ20M	400	4	420	2
MB14	400	3	420	2
ZK61M	400	6	450	3

镁合金的加热，必须严格遵守加热规范，加热时间越短越好，加热次数越少越好。

另外，采取如下两种措施也能得到细小而均匀的组织和较高的力学性能：

1）模锻后紧接着于 230～250℃之间进行半热态冷作硬化，半热态冷作硬化的平均变形程度为 10%～15%。

2）模锻后立即将锻件投入冷水中，以防止进一步再结晶和晶粒长大，从而提高锻件的力学性能。

（5）表面腐蚀

镁的电极电位比其他金属低，镁合金表面形成的氧化膜，没有铝合金的那样致密。因此，在潮湿的大气中，特别是与氯化物等溶液接触时，易引起镁的锈蚀，在锻件表面出现点状腐蚀。被腐蚀的镁合金呈暗灰色粉末状，经喷砂或酸洗处理，腐蚀点成为凹坑与小孔洞。

为解决镁合金的锈蚀问题，锻后，镁合金锻件应及时除油、酸洗、吹干。如需长期存放应氧化处理或涂油包装。

6 铜合金塑性成形件的常见缺陷与控制措施

铜的最大特点是具有很高的导电、导热性能以及良好的耐蚀性。但是，工业纯铜的强度不高（约 200 MPa），因而限制了它作为结构材料的使用。

为了提高铜的强度，并赋予特殊的性能，在铜中加入适量的合金元素，从而获得铜合金。铜合金具有较高的强度、韧性、耐磨性以及良好的导电、导热性能，特别是在空气中的耐腐蚀。因此，在电力、仪表、船舶等工业中得到了广泛的应用。一些要求强度高、耐热、耐压又耐蚀的轴类、凸缘类和阀体类零件都用铜合金锻件来制造。

铜合金主要分为黄铜和青铜两大类。以锌为主要合金元素的铜合金称为黄铜；以锡为主要合金元素的铜合金称为青铜。此外，还有白铜等其他铜合金。

黄铜的牌号、代号和化学成分见表 10.2-19。

变形青铜的牌号、代号和化学成分见表 10.2-20 及表 10.2-21。

表 10.2-19 黄铜的化学成分

组别	牌号	代号	化学成分（余量为锌）（质量分数）/%						
			铜	铅	锡	锰	铝	其他	杂质≤
普通黄铜	90 黄铜 70 黄铜 68 黄铜 62 黄铜	H90 H70 H68 H62	88～91 69～72 67～70 60.5～63.5						0.2 0.3 0.3 0.5
铅黄铜	60－1 铅黄铜 59－1 铅黄铜	HPb60－1 HPb59－1	59～61 57～60	0.6～1.0 0.8～0.9					0.5 0.75
锡黄铜	62－1 锡黄铜 60－1 锡黄铜	HSn62－1 HSn60－1	61～63 59～61		0.7～1.1 1.0～1.5				0.3 1.0
锰黄铜	58－2 锰黄铜	HMn58－2	57～60			1.0～2.0			1.2
铁黄铜	59－1－1 铁黄铜	HFe59－1－1	57～60		0.3～0.7	0.5～0.8	0.1～0.4	（铁） 0.6～1.2	0.25
镍黄铜	65－5 镍黄铜	HNi65－5	64～67					（镍） 5.0～6.5	0.3
硅黄铜	80－3 硅黄铜	Hsi80－3	79～81					（硅） 2.5～4.0	1.5

表 10.2-20　锡青铜的化学成分

牌号	代号	化学成分（余量为铜）（质量分数）/%				
		锡	磷	锌	铅	杂质≤
4-3锡青铜	QSn4-3	3.5~4.0		2.7~3.3		0.2
4-4-2.5锡青铜	QSn4-4-2.5	3~5		3~5	1.5~3.5	0.2
4-4-4锡青铜	QSn4-4-4	3~5		3~5	3.5~4.5	0.2
6.5-0.1锡青铜	QSn6.5-0.1	6~7	0.1~0.25			0.1
6.5-0.4锡青铜	QSn6.5-0.4	6~7	0.3~0.4			0.1
7-0.2锡青铜	QSn7-0.2	6~8	0.1~0.25			0.3
4-0.3锡青铜	QSn4-0.3	3.6~4.0	0.2~0.3			0.1

纯铜中的杂质主要有铅、铋、氧、硫、氢等。铜中杂质的存在不仅对使用性能有较大影响，而且对铜的工艺性能也有极坏的作用。

加热温度和变形程度对铜合金的组织和性能影响很大，当变形程度处于临界变形程度范围时，将引起粗晶。铜合金的临界变形程度范围大致是10%~15%，温度愈高，变形和再结晶后的晶粒尺寸也愈大。

对于$\alpha+\beta$铜合金（包括H62、H68、HPb59-1、QAL19-4等），如果加热温度超过$\alpha+\beta\rightarrow\beta$的转变点，此时由于失去了$\alpha$相对$\beta$相晶界迁移的机械阻碍作用，因而晶界迁移速度很快，$\beta$晶粒迅速长大，使合金塑性降低，锻造中容易开裂，并常在锻件表面出现“蛤蟆皮”。粗化后的铜合金晶粒，即使采用大变形程度进行塑性变形，再结晶后的晶粒也是很粗的。这是因为铜合金的层错能低，动态再结晶的速度快，而且，大变形时的热效应也较显著，故在高温下很快再结晶并迅速长大。

表 10.2-21　特殊青铜的化学成分

组别	牌号	代号	化学成分（余量为铜）（质量分数）/%					
			铝	铁	锰	镍	其他	杂质≤
铝青铜	5铝青铜	QAl5	4~6					1.6
	7铝青铜	QAl7	6~8					1.6
	9-2铝青铜	QAl9-2	8~10		1.5~2.6			1.7
	9-4铝青铜	QAl9-4	8~10	2~4	1~2			1.7
	10-3-1.5铝青铜	QAl10-3-1.5	9~11	2~4				0.75
	10-4-4铝青铜	QAl10-4-4	9.5~11	3.3~5.5		3.5~5.5		0.8
铍青铜	2铍青铜	QBe2				0.2~0.6	铍1.0~2.2	0.5
	2.15铍青铜	QBe2.15					铍2.0~2.3	1.2
	2.5铍青铜	QBe2.5				0.2~0.5	铍2.3~2.6	0.5
	1.7铍青铜	QBe1.7				0.2~0.4	铍1.6~1.85 钛0.10~0.25	0.5
	1.9铍青铜	QBe1.9				0.2~0.4	铍1.85~2.10 钛0.10~0.25	0.5
硅青铜	1-3硅青铜	QSi1-3			0.1~0.4		硅0.6~1.1	0.4
	3-1硅青铜	QSi3-1					硅2.75~3.5	1.1
锰青铜	5锰青铜	QMn5			4.5~5.5			0.9
镉青铜	1镉青铜	QCd1					镉0.90~1.2	
铬青铜	0.5铬青铜	QCr0.5					铬0.4~1.0	0.5

铜合金锻件组织中产生粗晶后，不能像碳钢那样，通过热处理的办法加以细化。因此，将使产品的力学性能降低（见表10.2-22）。

表 10.2-22　过热与未过热试样的力学性能

试样情况	σ_b/MPa	δ/%	试样情况	σ_b/MPa	δ/%
过热粗晶	290	34.5	正常细晶	415	44

冷变形和冷变形加时效处理对铜和铜合金性能有较大影响。

纯铜的强度较低，但塑性很高。因此，可以通过冷态形变使其强化。图10.2-54为变形程度对纯铜力学性能的影响。冷变形使铜的强度和硬度有较大提高，但塑性指标显著降低。冷变形使铜的电导率稍有降低（约降2.7%）。纯铜一般

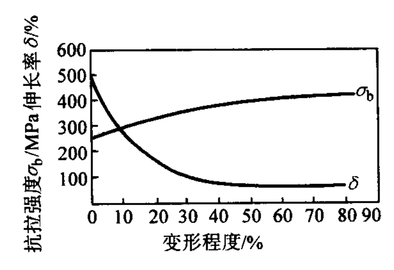


图 10.2-54　变形程度对纯铜力学性能的影响



是在加工硬化状态下用作导线。

还有些铜合金，也需用冷变形来提高其强度和硬度。例如，制造电极用的镉青铜（含镉的质量分数为 0.8% ~ 1.2%），经过冷变形后，可使抗拉强度从原来的 600 ~ 850 MPa提高到 1 100 MPa。锆青铜也常用于制造滚焊轮，硬度要求为 100 ~ 140HBS，而一般热锻固溶时效达不到技术要求。因此，锆青铜滚焊轮一般是热锻后，950℃固溶处理，再冷变形和时效处理。

铜合金的锻造特点是：

1）多数铜合金在室温和高温下具有良好的塑性。大多数铜合金在室温和高温下塑性很好，可以顺利地进行锻造，而且对应力状态和变形速度均不敏感，即使在高速变形或具有拉应力存在的条件下变形仍具有足够的塑性。图 10.2-55 ~ 图 10.2-57 是几种黄铜和青铜的塑性图。

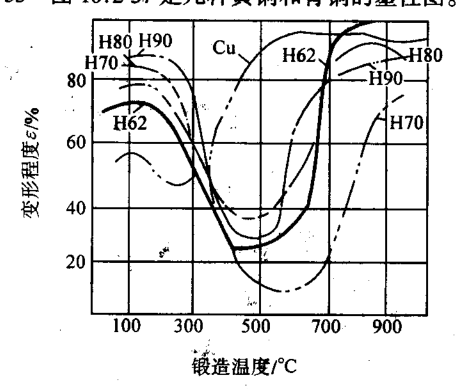


图 10.2-55　黄铜的塑性图

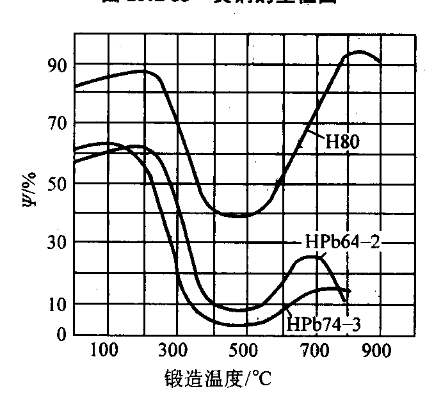


图 10.2-56　铅黄铜的塑性图

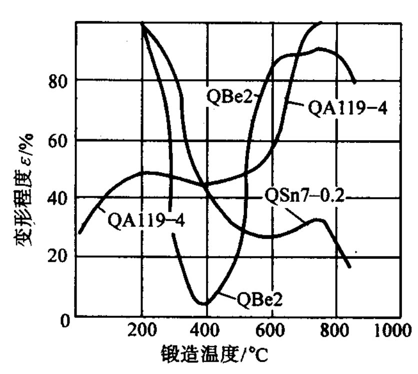


图 10.2-57　青铜的塑性区

但是，有少数铜合金，例如，含锡较高的锡磷青铜（如 QSn7-0.2）和含铅较高的铅黄铜（如 HPb59-1、HPb64-2），塑性较低，对拉应力状态较敏感。在静拉伸应力状态下变形时，QSn7-0.2 在室温呈单相 α 固溶体，具有很高的塑性，可以进行冷变形，但在高温下塑性很低（见图 10.2-57），其原因是在高温下有低熔点的（$\alpha+\beta+Cu_3P$）共晶体存在。含铅较高的铅黄铜对变形速率很敏感，在静拉伸和动拉伸二种变形条件下的塑性有明显的不同（见图 10.2-58），这类铜合金适于在压力机上锻造。

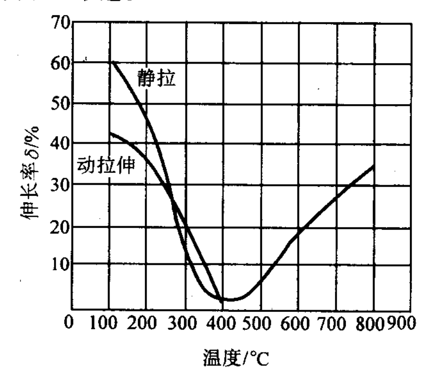


图 10.2-58　HPb63-3 铅黄铜在不同温度下的力学性能

2）存在中温脆性区。从图 10.2-55、图 10.2-56、图 10.2-57 可以看到，铜合金存在中温脆性区。以黄铜为例，在 20℃ ~ 200℃和 650℃ ~ 900℃两个温度范围内有很高的塑性，而在 250℃ ~ 650℃之间是一个脆性区，合金的塑性显著降低，很容易锻裂。其原因是合金中有铅、铋等杂质存在，它们在 α 固溶体中的溶解度极小，与铜形成 Cu-Pb 和 Cu-Bi 低熔点的共晶体，呈网状分布于 α 固溶体的晶界上，从而削弱了 α 晶粒之间的联系。当加热到 500℃以上时，发生 $\alpha+\beta\rightarrow\beta$ 转变，铅和铋溶于 β 固溶体中，于是塑性提高。表 10.2-23 为几种铜合金的脆性温度区。

由于中温脆性区的存在，很多铜合金的 $\alpha+\beta$ 双相区的塑性比 α 单相区的塑性高。因此，锻造变形主要在 $\alpha+\beta$ 双相区的温度范围进行。

3）锻造温度范围窄。铜合金的锻造温度范围比碳钢窄。所有铜合金的锻造温度范围都不超过 100 ~ 200℃，其中铅黄铜 HPb59-1、铝黄铜 HA177-2、HA160-1-1、HA159-3-2 及锡青铜 QSn7-0.2，QSn6.5-0.4 等合金的锻造温度范围尚不足 100℃。以 HPb59-1 为例，当加热温度超过 $\alpha+\beta\rightarrow\beta$ 转变温度（~700℃）时，β 晶粒急剧长大，使塑性降低；当变形温度低于 650℃时，变形抗力迅速增大，并可能进入中温脆性区。

表 10.2-23　几种铜合金的脆性温度区（$\varepsilon<40\%$）

合金牌号	脆性（或低塑性）区/℃	合金牌号	脆性（或低塑性）区/℃
H62	250 ~ 650	QAl5	370 ~ 530
H68	250 ~ 650	QSn4-4-2.5	>300
H80	400 ~ 500	QSn6.5-0.1	420 ~ 620
H90	400 ~ 650		
HPb64-2	>300		
HPb74-3	>250		

4）导热性好。铜具有很高的导热性，热导率 λ 为 385.48 W/m℃。铜中加入合金元素后，导热性有所降低。例如 H62 黄铜的热导率为 108.94 W/m·℃；QAl4 铝青铜的热导率则更低些，为 58.66 W/m·℃。但总的来说，铜合金的导热性比钢好，而且铜合金的导热性随温度升高而增加。所以，铜合金可以直接高温装炉，快速加热。

由于铜合金的导热性好，锻造时应采取必要的工艺措

施，以尽量减少金属的热量散失。

5）某些铜合金的热效应现象较显著　一些铜合金，例如锡磷青铜和锰青铜，锻造时热效应现象较显著。若变形速度过快，则由于热效应的作用，容易产生过热，甚至过烧。含铅量较高（超过2.5%）的铅黄铜模锻件，在变形程度较大的部位极易开裂。其原因也就是由于变形程度较大的部位热效应显著，使合金的温度升高，引起合金中低熔点杂质的熔化，破坏了晶间的联系。

另外，铜合金锻造时的外摩擦系数较大，所以流动性较差，模锻时难以成形。

铜合金锻造过程中的缺陷与控制措施如下。

（1）过热、过烧

铜合金加热温度超过始锻温度时要产生过热，α黄铜和（α+β）黄铜的过热倾向较大。这类黄铜，如加热温度超过β转变温度，晶粒会剧烈长大，锻造时坯料形成桔皮表面，甚至开裂。过热的（α+β）黄铜和（α+δ）铝青铜等快冷时，要出现魏氏组织。为避免过热，这类铜合金的加热温度不宜超过β转变温度，即在（α+β）两相区锻造为宜。

图10.2-59、图10.2-60是不同加热温度下铅黄铜的高倍组织。铅黄铜的含铜量变动范围较大（57%～60%），其实际含铜量对其β转变温度影响很大。因此，确定这种铅黄铜的转变温度时要考虑到实际铜含量的影响。根据试验，HPb59-1加热温度控制在710～730℃为宜。



图10.2-59　HPb59-1，740℃、7.5 min盐水淬火后的显微组织　250×

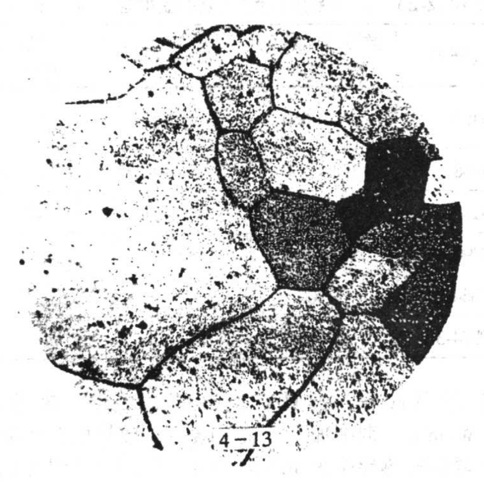


图10.2-60　HPb59-1，785℃、8 min盐水淬火后的显微组织　250×

铜合金过烧时，模锻件表面粗糙，无金属光泽，边缘处开裂；自由锻时开裂更为严重。铜合金过烧后，断口氧化很严重，无金属光泽，裂纹沿晶界扩展。图10.2-61为HPb59-1铅黄铜产生轻微过烧的显微组织。从图中可看到β晶粒粗大，部分α相沿β晶界析出，部分呈块状在晶内析出，裂纹沿晶界扩展。图10.2-62是HMn58-2铜合金严重过烧的实物照片。



图10.2-61　HPb59-1铜合金锻造裂纹沿晶界扩展　100×

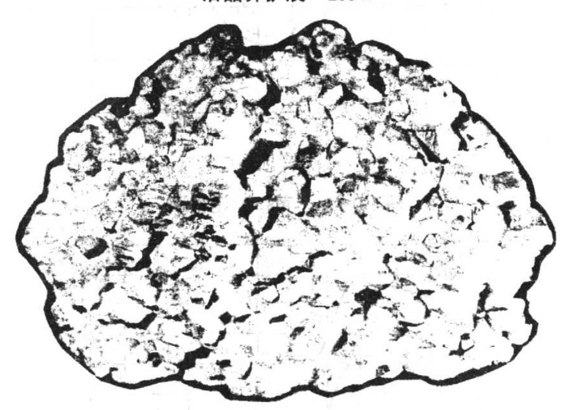


图10.2-62　HMn58-2铜合金严重过烧

为防止过热、过烧，应严格控制加热温度和时间。在油炉和煤炉中加热时，更应准确控制炉温以保证加热质量。为避免火焰直接喷射到坯料上引起局部过烧，可以在坯料上面覆盖一层薄铁皮。

（2）锻造裂纹

铜合金锻裂的原因主要有下列几方面：①坯料内部或表面有缺陷；②锻造温度不合适，材料塑性低；③变形程度过大或拉应力过大。

铜锭的表面质量较差，内部也常常有较严重的偏析，锻造时常易开裂。因此，铜锭需经均匀化退火，锻前要进行车皮。

锻造温度对铜合金的塑性影响很大。铜合金中由于加入了大量合金元素，始锻温度低，锻造温度范围窄，并存在中温脆性区。加热温度过高，容易产生过热、过烧，引起锻裂或粗晶。锻造温度过低时，有些铜合金（例如铁青铜），由于再结晶不充分，塑性降低，也常常产生裂纹。因此，要控制锻造温度不要过高或过低，并要避开中温脆性区。

有些铜合金锻件由于变形程度过大（热效应显著）或局部地方应力集中等原因也常产生锻裂。自由锻操作时，要勤翻轻击，避免在同一方向连续重击，以防止因热效应而引起过热、过烧。

（3）切边撕裂

铜合金锻件在胎模锻和模锻后，如立即进行切边，往往会在切边处有撕裂锻件本体的现象。当锻件冷却后再切边



时，就可避免这种缺陷。

（4）折叠

铜合金变形时，表面容易起皱。因此，较易产生折叠。例如，拔料时，如变形后的台阶较尖锐，在第二次锤击时就容易产生折叠。又例如，当阀体锻件的大本体上有小管接时，如采用压肩倒角的成形工艺，小管接处会由于变形不均匀产生缩孔；若再用镦粗法将其端面拍平，便会在管接与本体交接处形成折叠。因此，锻造铜合金时，工具和模具转角处的圆角半径要大一些，并要注意润滑；对于一些高度与直径比例不大的管接，适于采用在漏盘中挤压成型；对较易产生折叠的铜合金锻件，要考虑到以后的清理，在确定加工余量和计算用料时，应比碳钢取得大些。

（5）晶粒粗大

铜合金晶粒长大后不能像碳钢那样通过热处理加以细化，因此，晶粒粗大将使产品性能下降。铜合金晶粒粗大的原因：①坯料过热；②终锻温度过高；③锻造时的变形程度处于临界变形程度范围（10%～15%）内。

为了避免形成上述粗大晶粒，应当注意以下几点：①锻造时每次变形程度应大于10%～15%；②为保证适宜的终锻温度，应根据成形方式和变形量大小选择合适的始锻温度。例如QAl9-11合金胎模锻时900℃始锻，而自由锻时850℃始锻，原因是胎模锻较自由锻散热快。③(α+β)黄铜和青铜的加热温度应稍低于α+β→β的转变温度。

（6）应力腐蚀开裂

如果铜合金锻件内存在残余应力，则在潮湿大气中，特别是在含氨盐的大气中会引起应力腐蚀开裂，也称季裂。防止这种缺陷的对策是：①锻造时，应使锻件上各处的变形量和变形温度比较均匀。例如，锻造长轴类锻件时，应将工件经常调头变形，使各部分的变形温度相近，以减小内应力；②铜合金锻造后，要及时在260～300℃范围内进行消除应力退火。

（7）氢气病

所有高铜的铜合金（如H90），铝青铜及铜镍合金，在高温下极易氧化。含有氧的铜合金，如在含有 H_2、CO、CH_4 等的还原气氛中加热，则这些气体会向金属内扩散，与 Cu_2O 化合而生成不溶于铜的水蒸气或 CO_2。这种水蒸气具有一定的压力，力图从金属内部逸出，结果在金属内部形成微小裂纹，使合金变脆，即所谓氢气病。因此，加热铜合金时，炉子气氛最好是中性的。

7　钛合金塑性成形件的常见缺陷与控制措施

钛有许多明显优越的特性：密度小（4 500 kg/m³）、熔点高（1 660℃）、耐腐蚀性强、比强度高、塑性好，还可以通过合金化及热处理的办法制造出力学性能高的各种合金。

工业上除采用工业纯钛制造零件以外，大量使用的是钛合金。

纯钛具有两种同素异构结构。在885℃以上是体心立方晶格，称为β钛；在885℃以下是密排六方晶格，称为α钛。由于添加元素的种类及数量不同，α相与β相之间的变态是不同的。按室温下组织的不同，钛合金可分为三类：α钛合金（以TA表示）；α+β钛合金（以TC表示）和β钛合金（以TB表示）。表10.2-24列出了一般钛合金的化学成分。

α钛合金主要含有α稳定化元素Al，其次为Zr和Sn。由于Al对α相的稳定作用，因此α钛合金室温下的显微组织是由100%α相组成。但是，随着α钛合金加热至β相区后冷却速度的不同，α相的形态是不一样的。

当α钛合金加热到β相区，并以较慢的冷却速度通过转变温度范围时，β相转变为条状α相。由于它和钢中的魏氏组织相似，称为魏氏α组织。若在转变温度范围内以较快的速度冷却，β相则转变为针状α相。由于它和钢中的马氏体很相像，称为马氏α组织，并用α′表示。不论是马氏α还是魏氏α，它们都是β相转变的产物，形态相似，统称为针状α体。具有条状或针状组织的α钛合金，性质是很脆的。只有在α+β相区经过变形和再结晶，才可以获得等轴细晶粒的α组织。这种组织的α钛合金，室温的塑性很好。由于α合金自β相变以上温度快速淬火也不改变其平衡成分，所以它不可能用热处理强化。因而，只具有中等的强度。

α钛合金的组织稳定，抗蠕变性能好，可以在较高温度下工作，是创制新型耐热合金的基础。α钛合金的热处理方式是退火。

β钛合金含有高量β相稳定元素Mo、V、Cr、Fe，Mn等。因此，淬火或空冷都可以很容易地使β相保留下来，其塑性很高，容易加工成形。该种合金在低温时效时，β发生分解而析出弥散的α相，使合金得到强化。因此，β钛合金是可以进行淬火，时效强化。热处理方式是淬火，时效。

(α+β)钛合金是既含有一定量的β稳定化元素，又含有一定量α稳定化元素的合金。前者含量较多的合金称为强β稳定的（α+β）钛合金；而后者含量较少的合金称为弱β稳定的α+β钛合金。

(α+β)钛合金是可以热处理强化的合金。但是，弱β稳定的（α+β）钛合金热处理强化效果不如强β稳定的(α+β)钛合金，因此，它的使用状态是退火状态。而强β稳定的（α+β）钛合金，使用状态则是淬火、时效状态。

图10.2-63是钛合金的塑性图，由该图可以看出α钛合金TA2的塑性最好，在室温下的允许变形程度可达50%～60%，在600℃时可达80%，在900℃时可达可达90%。α钛合金TA5和α+β钛合金TC6在室温下的塑性比α钛合金TA2低，只有22%～28%。但在600℃以后，它们的塑性和α钛合金TA2的塑性趋于一致，于900℃时达到最大值。另外，在900℃以下钛合金在静变形时的塑性比在冲击变形时高一些，但在900℃以上变形速度对钛合金塑性的影响是不明显的。

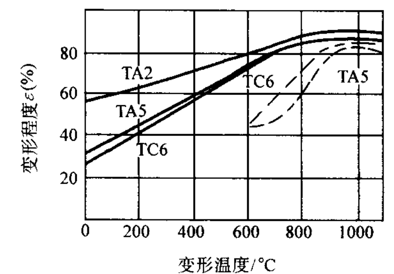


图10.2-63　钛合金的塑性图

锻造温度、变形程度对钛合金组织和性能有较大的影响，现以TC4等钛合金为例介绍如下。

TC4是国内外应用最广泛的一种α+β型钛合金。它通常在退火状态下使用，由于退火温度（一般为800℃）低于锻造加热温度，因此其组织和性能主要取决锻造工艺。按照传统的α+β锻造方法，合金是在α+β区（即低于β转变点）加热锻造的，获得的高倍组织通常为等轴组织（图10.2-64i～l）或等轴与条状的混合组织（图10.2-64h），其相应的低倍组织通常为沿主变形方向被拉长的轮廓模糊的晶粒组织（图10.2-65h、i），同属α+β锻造，锻前加热温度的高低将导致锻件中初生α比例的差异，温度低于β相变点越多，则初生α所占比例就越大。在锻造过程中，如果由于变形热效应导致金属温度超过锻前加热温度，则锻件高倍组织中初生α的比例将取决于锻件的实际温度。对于锻压变形量较大的锻件来说，变形的热效应问题更应该特别注意。

等轴显微组织有较好的室温塑性（断面收缩率Ψ和伸

表 10.2-24　工业钛合金的化学成分及性能

牌号	主要成分（质量分数）/%												杂质不大于（质量分数）/%						状态	室温性能					高温性能			备注
	Ti	Al	Cr	Mo	Sn	Mn	V	Fe	Cu	Si	Zr	B	Fe	Si	C	N	H	O		σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	ψ%	a_k/MJ·m^{-2}	温度/℃	σ_b/MPa	σ_{100}/MPa	
TA0	基												0.03	0.03	0.03	0.01	0.015	0.05	退火									碘化钛
TA1	基												0.15	0.10	0.05	0.03	0.15	0.10	退火	350		25	50	0.8				棒材
TA2	基												0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15	退火	450		20	45	0.7				棒材
TA3	基												0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15	退火	550		15	40	0.5				棒材
TA4	基	2.0～3.3											0.30	0.05	0.10	0.05	0.015	0.15	退火									棒材
TA5	基	3.3～4.3										0.005	0.30	0.15	0.10	0.04	0.015	0.15	退火	700		15	40	0.6				棒材
TA6	基	4.0～5.5											0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15	退火	700		10	27	0.3	350	430	400	棒材
TA7	基	4.0～5.5			2.0～3.0				2.5～3.2		1.0～1.5		0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.20	退火	800		10	27	0.3	350	500	450	棒材
TA8	基	4.5～5.5			2.0～3.0								0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15	淬火 时效	1 000		10	25	0.2～0.3	500	700	500	棒材
TB1	基	3.0～4.0	10.0～11.5	7.0～8.0									0.30	0.15	0.10	0.04	0.015	0.15	淬火 时效	≤1 000 1 300		18 5	30 10	0.3 0.15				棒材
TB2	基	2.5～3.5	7.5～8.5	4.7～5.7			4.7～5.7						0.30	0.05	0.05	0.04	0.015	0.15	淬火 时效	≤1 000 1 400		18 7	40 10	0.3 0.15				棒材
TC1	基	1.0～2.5				0.8～2.0							0.40	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15	退火	600		15	30	0.45	350	350	330	棒材
TC2	基	2.0～3.5				0.8～2.0							0.40	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15	退火	700		12	30	0.4	350	430	400	棒材
TC3	基	4.5～6.0					3.5～4.5						0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15	退火	900		10			400	600	550	板材（1.0～2.0）
TC4	基	5.5～6.8					3.5～4.5						0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15	退火	950		10	30	0.4	400	630	580	棒材
TC5	基	4.0～6.2	2.0～3.0										0.50	0.40	0.10	0.05	0.015	0.20	退火	950		10	23	0.3	400	600	560	棒材
TC6	基	4.5～6.2	1.0～2.5	1.0～2.8				0.5～1.5						0.40	0.10	0.05	0.015	0.20	退火	950		10	23	0.3	450	600	550	棒材
TC7	基	5.0～6.5	0.4～0.9					0.25～0.60		0.25～0.60		0.01			0.10	0.05	0.025	0.30	退火	1 000		10	23	0.35	550	600		棒材
TC8	基	5.8～6.8		2.8～3.8						0.20～0.35					0.10	0.05	0.015	0.15	退火	1 050		10	30	0.3	450	720	700	棒材
TC9	基	5.8～6.8		2.8～3.8						0.20～0.40					0.10	0.05	0.015	0.15	退火	1 140		9	25	0.3	500	650	620	棒材
TC10	基	5.5～6.5					5.5～6.5	0.35～1.0	0.35～1.0					0.15	0.10	0.04	0.015	0.20	退火	1 050 1 050		12 12	25 30	0.35 0.4	400	850	800	锻棒 轧棒

注：其化学成分及性能详见 GB/T 3620—1994，GB/T 3621—1994。

长率 δ）和疲劳性能，初生 α 比例大的更是如此。因此，通常希望钛合金（特别是转子零件），具有等轴显微组织，而且要求初生 α 比例不得低于某一数值（例如 15% 或 20%），当初生 α 比例低于此值时，就通称为过热组织。这就要求采用传统的 α+β 锻造方法锻造，而且要求锻造前加热温度至少低于 β 相变点 30℃，有时甚至低 80℃左右。但是，等轴显微组织的断裂韧性和高温蠕变抗力较差，特别是初生 α 比例高的（例如初生 α 占 60% ~ 85%）更甚。因此，从综合角度看，则应该设法把锻件组织中的初生 α 比例控制在适当的范围之内（例如 15% ~ 45%），以期获得较满意的综合性能。这就要求把 α+β 锻造的加热温度（主要指最终一火的加热温度）控制在 β 相变点以下 20 ~ 40℃。近期发展起来的新的热处理规范（淬火过时效），把热处理温度提高至 β 相变点以下 30℃左右，则能更可靠地把初生 α 比例控制在 30% 左右。这样，即使由于锻造温度偏低而使初生 α 比例偏高，但经热处理后就能重新减少至适当的初生 α 比例。

国内外后期发展起来的 β 锻造方法是在 β 相变点以上加热后用大变形量进行锻造（终锻往往在 α+β 区完成）。如果工艺掌握得好，所获得的组织通常为变形的魏氏组织（为条状组织，但条状已被不同程度地扭曲，原始晶界已被不同程度地破碎），如图 10.2-64e ~ g 所示。相应的低倍组织通常为轮廓不太清晰的晶粒，如图 10.2-65f、g 所示。若 β 锻造工艺掌握不当，即在 α+β 区域无变形量或小变形量，甚至在 β 区域也无变形量或小变形量，则获得的高倍组织为未变形的典型魏氏组织（条状组织平直，原始 β 晶界清晰完整），如图 10.2-64a ~ c 所示。其相应的低倍组织为轮廓清晰的等轴晶粒，如图 10.2-65a ~ e 所示。因此，为获得良好的组织，每次变形量应尽可能大些，最后一火的变形量应不小于 50%。未经变形的魏氏组织的室温塑性和疲劳性能很低，但经过变形的魏氏组织（即 β 锻造后的组织）则具有较好的性能。经 β 锻造的钛合金同 α+β 锻造的相比，其力学性能如表 10.2-25 所示。由表 10.2-25 可以看出：①经 β 锻造的钛合金具有最佳的高温蠕变强度和优越的断裂韧性；②经变形的魏氏组织虽然室温塑性比等轴显微组织低一些，但一般均高于技术条件的要求；③经变形的魏氏组织的疲劳性能，虽然在可靠性和稳定性方面还未被公认，但有些数据表明其疲劳性能并不亚于等轴晶粒，与未经变形的魏氏组织相比，有了相当的改善。

(a)　(b)　(c)

(d)　(e)　(f)

(g)　(h)　(i)

(j)　(k)　(l)

图 10.2-64　TC4 钛合金锻件典型的高倍组织（退火状态）　500×

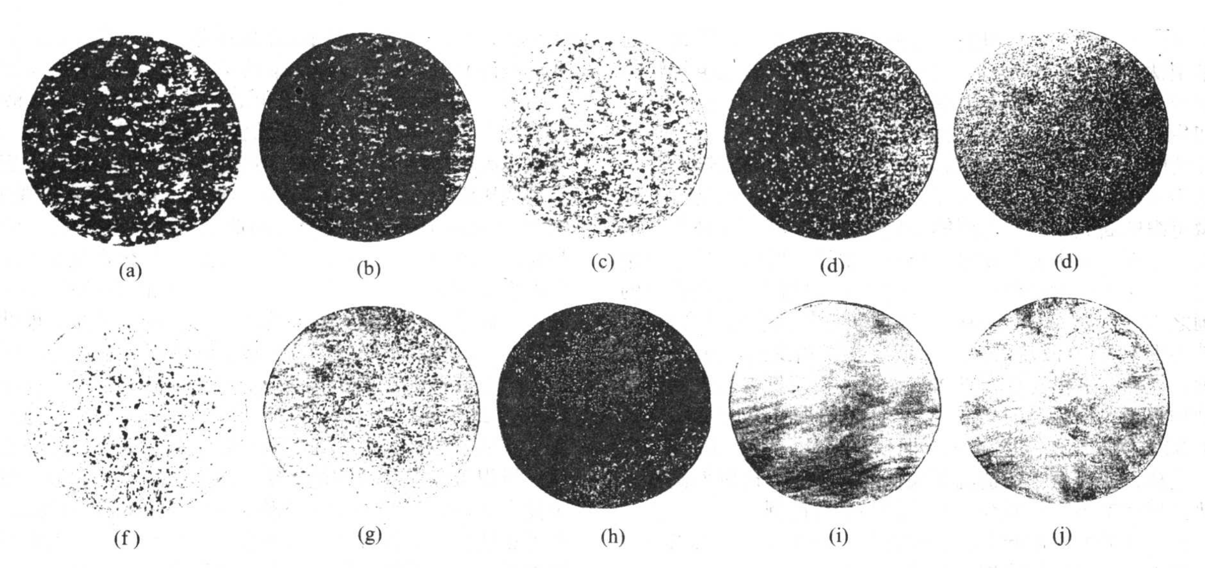


图 10.2-65　TC4 钛合金锻件典型低倍组织（退火状态）

表 10.2-25　经 β 锻造的钛合金与 α + β 锻造的钛合金的性能比较

力学性能	Ti-6Al-4V	Ti-8Al-1Mo-1V	Ti-6Al + 2 Sn-4Zr-2Mo
屈服强度（室温）	略低	略低	略低
抗拉强度（室温）	同样	同样	同样
伸长率	略低	略低	略低
断面收缩率	减小	减小	减小
缺口抗拉强度（$K_i = 10$）	提高	提高	提高
缺口持久强度（$K_i = 3.8$）	提高	提高	提高
疲劳强度（10^7 周）	同样	不明	同样
蠕变稳定性	同样	同样	同样
断裂韧性	提高	提高	提高
蠕变稳定强度	提高	提高	同样

经 β 锻造后，断裂韧度之所以得到提高，乃是由于板状 α 相和等轴 α 相在强度基本相同的情况下，前者具有较高的断裂韧度。因为裂纹遇到 α 板条时发生转折，所以只有在产生很大的塑性变形的条件下，α 相才能发生开裂。表 10.2-26 是两种形貌的 α 相的力学性能比较。

表 10.2-26　等轴和板条 α 相的力学性能比较

α 相形貌	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	夏比冲击韧度 /J·cm^{-2}	K_{1c} /MPa·m$^{-\frac{1}{2}}$	蒸馏水中应力腐蚀 K_{1c}/MPa·m$^{-\frac{1}{2}}$	蒸馏水中应力腐蚀 断裂时间 /min
等轴	1 122	1 306	60.5	153.5	122	4
条板	1 102	1 215	88	> 189.5	122	> 4 000

β 锻造除可以提高合金的断裂韧性和蠕变强度之外，还可以减小锻造时的变形抗力和提高工艺塑性。这对锻造大尺寸的钛合金锻件和精密模锻是很重要的。

综上所述，可以看出 β 锻造的应用范围是完全可能不断扩大的。但由于在疲劳性能方面尚不能令人放心，因此当前基本上只应用于非转子零件的制造。例如，美国 TF39 发动机的 Ti-6A1-4V 转子叶片，已采用 β 锻造方法进行精密模锻。

图 10.2-65j 所示的低倍组织，虽然呈现出较模糊的粗大晶粒轮廓，但观察其高倍组织，则已属于通常希望的细小等轴组织（10.2-64j、k）。按技术条件检验其室温拉伸等性能也均合格，因此过去曾称它为“伪大晶粒”。由于这种组织的疲劳强度、断裂韧度等性能尚不够清楚，因此能否采用尚待进一步研究确定。

上面简要讨论了锻造工艺、高倍组织和力学性能三者之间的联系。总的来说，必须辩证地加以分析和处理：对于偏重要求疲劳性能的零件来说，当工艺条件允许时，采用较低温度（例如低于 β 相变点 50 ~ 80℃）的 α + β 锻造方法，以期获得初生 α 比例较高的等轴显微组织，保证较长的疲劳寿命；对于偏重要求高温蠕变强度或断裂韧性的零件来说，可以采用 β 锻造方法，以期获得变形的魏氏组织（有时也称网兰状组织）；对于要求综合性能（即兼顾室温塑性、疲劳强度、蠕变强度、断裂韧性等性能）的零件来说，应该采用较高温度（例如低于 β 相变点 30℃左右加热）的 α + β 锻造方法，以期获得初生 α 比例适中（例如 15% ~ 45 %）的显微组织。但不管使用条件如何，一般均不允许采用未经变形的典型的魏氏组织。

钛合金的锻造特点是：

1）变形抗力大。由图 10.2-66 可知，在锻造温度下钛合金的变形抗力比钢高。同时，钛合金的变形抗力随温度降低而升高的速度比钢要快得多。由此可知，在模锻钛合金时，即使锻件温度有少许降低，也将导致变形抗力大大增加。

对于某些 α + β 钛合金来说，变形抗力对于温度的这种敏感性，主要是在 α + β/β 相变以下温度才更加明显，如图 10.2-67 所示。

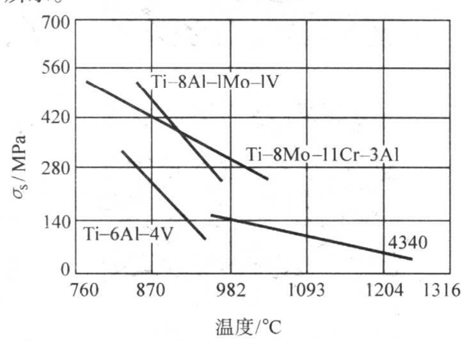
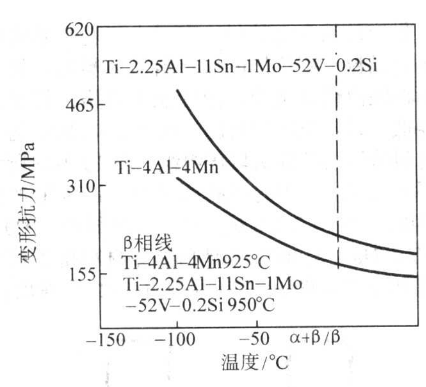


图 10.2-66　锻造温度对钛合金及铬镍钼合金结构钢变形抗力的影响





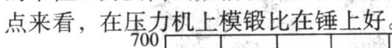


图 10.2-67　两种钛合金的变形抗力与 α + β/β 温度的关系曲线

变形速度对钛合金的变形抗力影响较大，从图 10.2-68 可以看出：在锤上变形时的单位压力，比在压力机上变形时的单位压力要高出数倍。因此，从减小模锻时能量消耗的观点来看，在压力机上模锻比在锤上好。

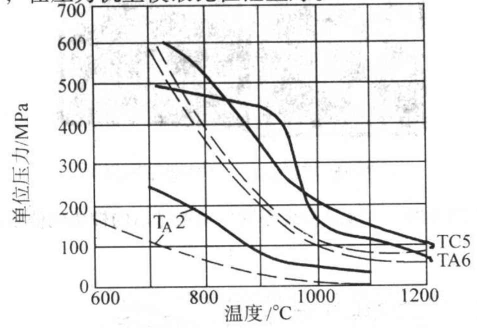


图 10.2-68　变形程度为 40%时，钛合金单位压力与温度的关系

实线—冲击变形；虚线---静变形

2）导热性差。钛合金的导热性比钢、铝等金属差。因此，锻坯出炉后表面冷却快。如操作慢，就会造成较大的内外温度差。这往往导致锻造过程中产生开裂现象，加剧坯料内外变形程度分布的不均匀性。变形的不均匀性又必然导致锻件组织和力学性能的不均匀性。金属温度的下降也会急剧增加变形抗力而使成形困难，甚至损坏锻造设备。为了减小坯料表面的冷却速度，充分预热锻模、夹钳等与坯料直接接触的工具是十分重要的。

3）黏性大、流动性差。与钢相比，钛合金的黏性大、流动性差，模锻（包括挤压）时必须加强润滑，否则容易产生粘模和金属“倒流”现象，模锻和挤压力也会由于摩擦力的剧增而显著升高。试验表明，不采用润滑剂时，镦粗钛合金的摩擦系数高达 0.5，如采用玻璃润滑剂，摩擦系数降至 0.04～0.06。

润滑条件能显著地影响钛合金的流动性和变形抗力。例如在高速锤上挤压大扭角的 Ti－6Al－4V 叶片时，如果模具涂 PbO＋炮油润滑，坯料涂安瓶玻璃润滑，即使把挤压温度提高到 1 080℃，叶尖部分仍不能充满。如果在模具上改涂 L_2 低温玻璃润滑剂，于 980℃挤压就能顺利地充满叶尖部分，甚至在 920℃挤压问题也不大。从相应的打击能量来看，当模具涂以 PbO＋炮油时，所需的打击能量：1 080℃时为 100 kJ，1 000℃时为 115 kJ；当模具涂 L_2 低温玻璃润滑剂时，1 000℃时降至 90 kJ，960℃时也只需 97 kJ。

锻造过程中常见的缺陷和控制措施如下。

（1）合金元素偏析和夹杂

合金元素偏析和夹杂都是存在于锻件中的冶金缺陷。

钛合金常见的合金元素偏析可分三类：

1）α 型偏析，即富集稳定 α 元素（如铝、氧、氮）的偏析。

2）β 型偏析，即富集稳定 β 元素（如钼、钒）的偏析。

3）纯钛型偏析（包括贫合金元素的偏析）。由于 α 型偏析是脆性偏析（其硬度通常显著高于基体），故危险性最大。美国一飞机曾在飞行过程中发生钛合金压气机盘破裂飞出的重大事故，故障分析的结果系 α 型偏析所致。因此，必须严格检查产品的偏析情况。其检查方法包括表面腐蚀、发蓝阳极化、动态荧光检查等。

钛合金锻件中的夹杂物容易引起裂纹的发生和发展。因此必须用超声波、X 光等无损探伤方法严格检查产品的质量，不允许带有夹杂物的零件投入使用。图 10.2-69 所示为 TC4 锻件中发现的钨夹杂。图 10.2-70、图 10.2-71 所示为 TC4 叶片锻件开裂处发现的钛化物夹杂。

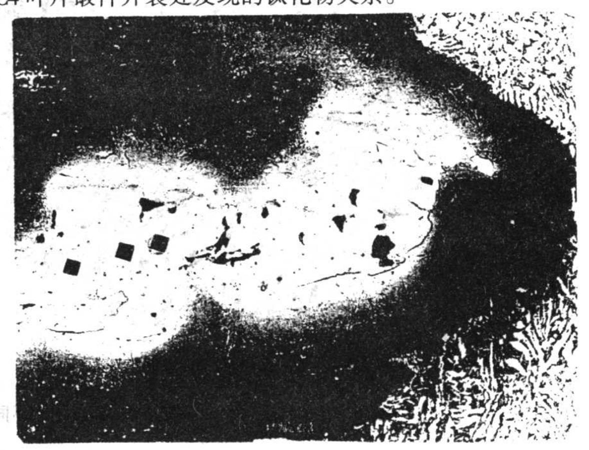
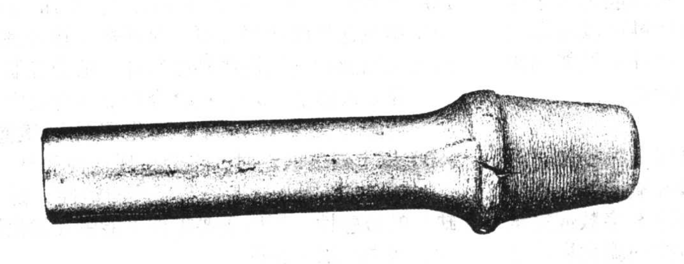
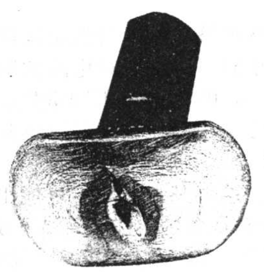


图 10.2-69　TC4 钛合金锻件中钨夹杂物　450×



(a)



(b)

图 10.2-70　预锻件表面裂纹（a）和顶端裂口　（b）

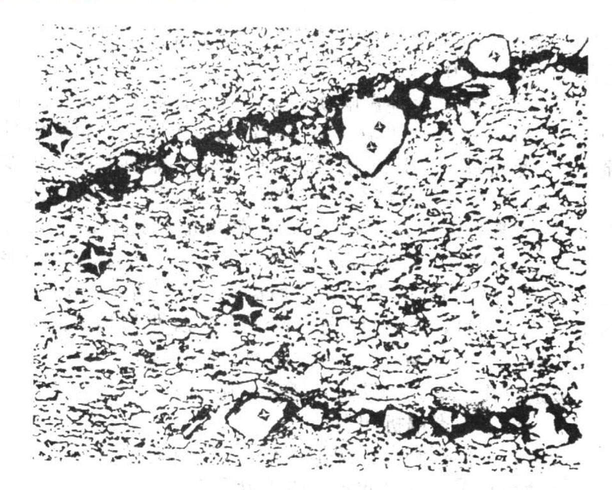


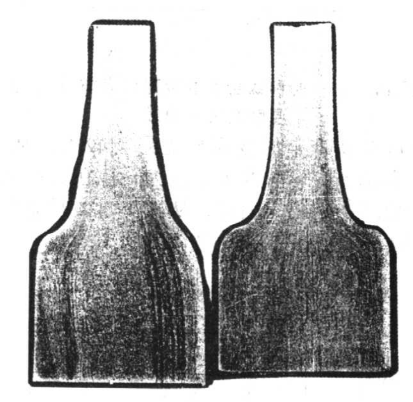
图 10.2-71　沿裂纹有大量钛化物夹杂　300×

（2）铸造组织残留

钛合金的铸造组织与钢相比，是较难破碎的。因此，如果采用的锻造工艺不当，就容易残留铸造组织，使伸长率、断面收缩率、疲劳强度等性能指标不符合要求。某些工作表明，当锻比大于10时，铸造组织才能充分破碎。当采用简单的锻造方法，不能达到足够的锻比和不能充分破碎铸造组织时，就应采用反复镦拔的锻造方法。

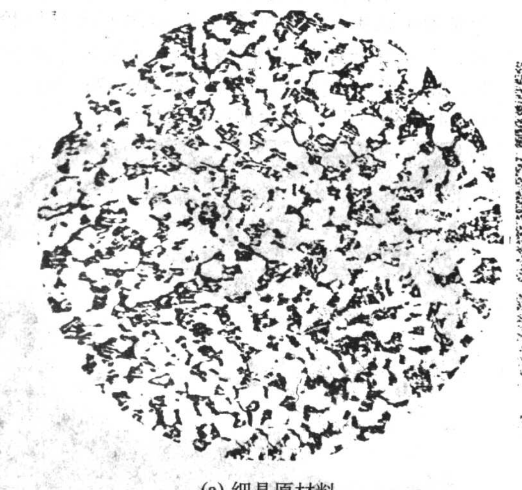
（3）原材料粗晶组织残留

冶金厂供应的钛合金轧材，有时由于轧制温度高等原因而存在有粗大晶粒。用这样的原材料做坯料时，如果变形程度不足，则将保留粗晶组织，使性能不合格，甚至比原材料的性能还要低。以挤压叶片为例，图 10.2-72 所示为采用不同组织的原材料挤压后的榫头低倍组织。图 10.2-73 所示为其高倍组织。图 10.2-72a 是用的粗晶原材料（1 030℃加热的轧材见图 10.2-74b)。图 10.2-72b 是用的细晶原材料（920℃加热的轧材见图 10.2-74a。表 10.2-27 是粗晶原材料挤压前后的性能比较。从图 10.2-72～图 10.2-74 和表 10.2-27 可看出：



(a) 粗晶原材料　　(b) 细晶原材料

图 10.2-72　TC4 钛合金不同原材料锻后的榫头低倍组织



(a) 细晶原材料



(b) 粗晶原材料

图 10.2-73　TC4 钛合金不同原材料锻后榫头的高倍组织　500×

1）用粗晶原材料挤压后的榫头组织仍很粗大（锻比为1.1)，性能较低。

2）用粗晶原材料挤压的叶身低倍组织和性能都有了很大的改善（锻比为5)，这说明对粗晶的原材料可以用增大变形程度来细化。表 10.2-28 是不同镦粗比对榫头性能的影响。图 10.2-75 所示为镦粗比增大后的榫头组织。

（4）α脆化层

在α+β钛合金的加热过程中，可能出现α脆化层。所谓α脆化层，就是指钛合金锻件在高温下吸收氧和氮达到一定数量（如氧为4%～5%）时，其表层组织β相多数或完全被α相所代替，形成钛与氧和氮的间隙固溶体的脆化层，也就是去除氧化皮后金属表面的污染层。

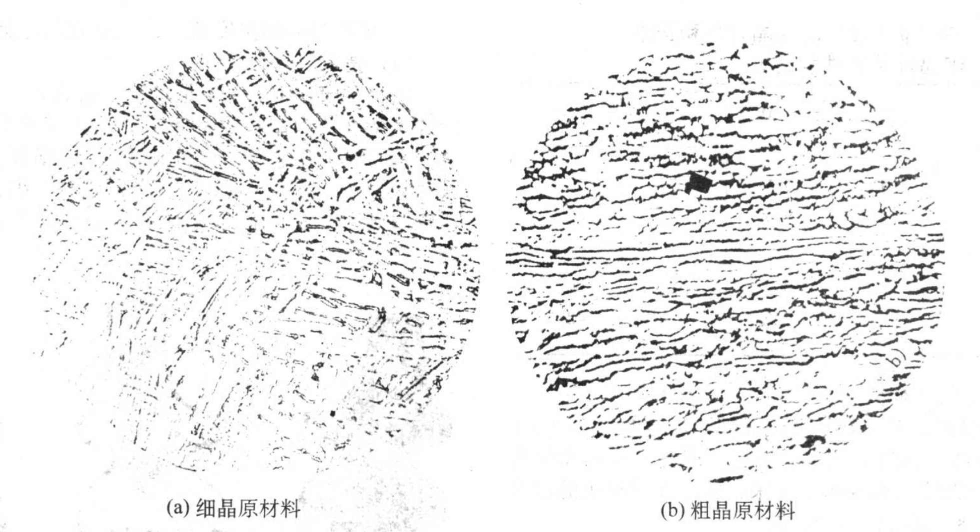
α脆化层的深度与锻造或热处理时加热所用的炉子类型、炉气性质、坯料（或零件）的加热温度及保温时间有关。它随加热温度的升高、保温时间的延长而加深，随炉气中含氧量和含氮量的增多而加厚。例如，TC4 合金在 950℃加热半小时，α层约为 0.17 mm，加热 1 h 为 0.19 mm；在 1 000℃加热半小时为 0.18 mm，加热 1h 为 0.20 mm。所以，为了避免这种脆化层太厚，对锻造和热处理的加热温度、保温时间以及炉气的性质都必须加以适当控制。

在α钛合金、α+β钛合金和β钛合金中都可能出现脆化层。不过α合金对形成α脆化层特别敏感，而β合金在980℃以上温度锻造时，也会出现这种现象。

α脆化层能明显地降低零件的塑性、韧性和增加零件对缺口的敏感性，所以重要零件不能带α脆化层使用，需经吹砂、酸洗或加工去除。

（5）氢脆

钛和钛合金的化学性质很活泼，在 20℃时就吸收氢气，300℃时吸收氢气的速度就非常快。在低于 α/α+β 转变温度，进入钛和钛合金中的氢气溶于α相中，不过溶解度较小。



(a) 细晶原材料　　(b) 粗晶原材料

图 10.2-74　TC4 钛合金原材料的高倍组织　500×

表 10.2-27　粗晶原材料挤压前后的性能比较

取样部位		σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
榫头	$y=1.1$	1 050	970	10.5	25.0
		1 060	985	12.0	25.5
	$y=1.22$	1 030	965	12.5	50.5
		1 030	955	11.5	40.5
叶身		1 080	975	18.0	56.5
		1 065	995	20.5	51.5
1 030℃轧材		1 000	—	12.0	30.5

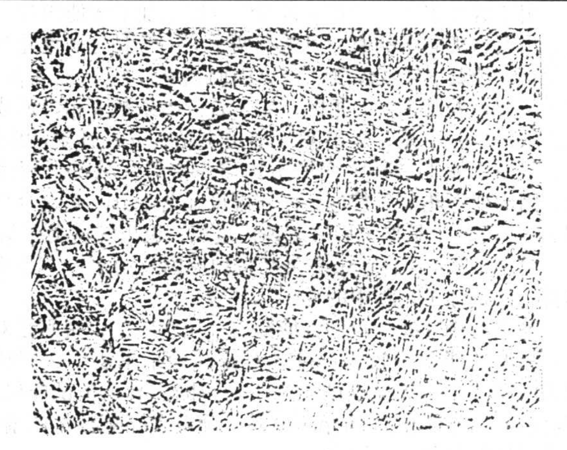


图 10.2-75　镦粗比增大后的叶片
榫头组织　500×

表 10.2-28　不同锻比对榫头性能的影响

	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
$y=1.2$	1 025	1 010	10.0	34.0
	1 040	995	12.5	30.5
$y=1.4$	1 035	1 000	15.5	41.5
	1 015	975	16.0	46.0

注：y 为锻比。

在 α+β 两相区内，氢在 β 相中的溶解度比在 α 相中的溶解度大很多。如果锻造或热处理加热炉内是还原性气体，加热时吸氢现象就更严重。在锻造或热处理后的酸洗中，以及与油等碳氢化合物接触中都可能增强吸氢现象。如果进入钛合金的氢过多，除一部分溶入 α 或 α+β 相中外，另一部分便要和钛化合成钛氢化合物而析出，使钛合金缓慢地变脆，即产生氢脆。这样的钛合金零件在工作过程中，在应力长时间作用下，对应力集中很敏感，冲击韧度和缺口抗张强度显著下降，致使零件产生脆性断裂。

所以，钛合金中氢的含量必须严格控制。标准中规定的含氢量一般都不超过 0.012 5%～0.02%。如果添加 Al、Sn 等合金元素以增加氢在 α 钛中溶解度或增加 β 稳定元素（如 Mo、V 等），使合金在室温下残留少量 β 相，以便使较多的氢溶于 β 相中，那么，钛合金的氢脆现象便可相应减少。

其次，为了防止或减少氢脆、锻造或热处理加热时应使炉子略带氧气性气氛。对于重要的钛合金零件，还要进行真空退火，以消除氢脆。

（6）β 脆性

“β 脆性”是 α+β 型钛合金和 β 型钛合金锻件常见的质量问题。“β 脆性”是由于锻件过热引起的。其高倍组织是由完整明显的原始 β 晶界和平直细长的魏氏 α 所组成，即前面谈到的未经变形的魏氏组织。有“β 脆性”的锻件，塑性指标大幅度下降。图 10.2-77 是高速锤挤压的有“β 脆性”的 TC4（Ti－6Al－4V）粗晶叶片。图 10.2-76 是正常工艺挤压的 TCA 细晶叶片。两种叶片的力学性能数据见表 10.2-29。有“β 脆性”的锻件，由于塑性低于所要求的指标（$\delta \geqslant 10\%$，$\psi \geqslant 25\%$），因此是不允许的缺陷。

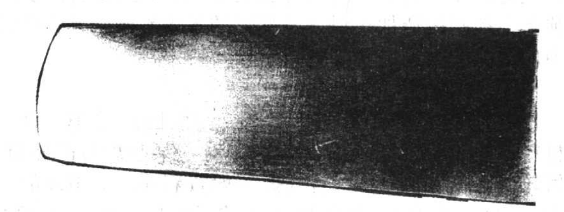


图 10.2-76　正常生产的 TC4 钛合金的细晶叶片

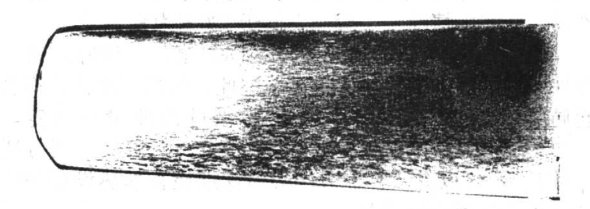


图 10.2-77　有“β 脆性”的 TC4 钛合金粗晶叶片



表 10.2-29　有"β脆性"的粗晶叶片和正常细晶叶片的性能比较

晶粒度		σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
粗晶	1	1 030	955	7	26.5
	2	1 020	948	12.3	24.9
细晶	1	993	958	19.3	50.4
	2	965	936	16.6	42.1

"β脆性"常由下列情况引起。

1）α+β锻造时，整个坯料（或局部）加热温度超过α+β/β相变点，锻件变形量又较小，不能使原始β晶界和粗大的魏氏组织发生改变而被保留了下来，粗晶叶片榫头的过热组织（图 10.2-78）就是这样形成的。

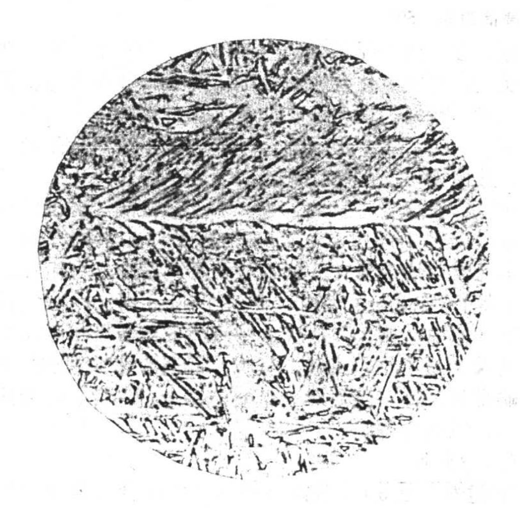


图 10.2-78　有"β"脆性 TC4 钛合金粗晶叶片榫头的高倍组织　500×

2）坯料加热温度虽在α+β/β相变点以下，但一次变形量过大，由于热效应使温度超过相变点，也会引起局部过热。

钛合金过热与钢不一样，它无法通过热处理的办法来消除"β脆性"，只能通过在两相区的大变形来破碎，细化组织，改善性能。因此，为确保钛合金锻件的组织性能要求，必须严格控制锻造加热温度及变形的各项参数，并在产品检验中应对晶粒大小有明确的要求。

消除"β脆性"的措施如下。

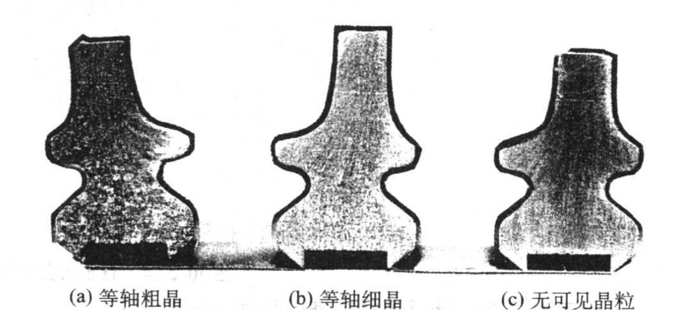
1）选择合适的锻造加热温度。目前国产的 TC4 钛合金原材料，其α+β/β温度变化较大，对于某些炉号的原材料，其值较低，仅为 950℃左右（据一般资料报道，TC4 的相变温度为 985℃左右）。如采用通常的（960～970℃）±10℃的加热温度就易于产生"β脆性"。因而，目前按（$T\alpha+\beta/\beta-30$℃）±10℃控制是比较合适的。同时考虑到设备的能量条件及工艺实施情况，一般以不低于 920℃为宜。

2）由于钛合金的加热温度区间狭窄，而像叶片这一类锻件同一炉加热的数量又较多，因此，如操作不良，将会引起局部坯料过热，造成同一锻批锻件的质量不稳定。图 10.2-79 所示就是同炉批叶片的不同组织，粗晶的则可能有"β脆性"。所以对钛合金锻件必须详细检查加热设备的恒温区分布及温度控制情况。

3）根据具体的温度情况，采用适当的变形程度。

（7）亮条

钛合金锻件中的亮条是存在于低倍组织中的一条条具有异常光亮度的肉眼可见的带。它沿加工方向延伸，长度不一，有的仅十几毫米，有的则很长。在横断面上，它呈点状或片状分布，形状无规则。亮条的显微组织，一般与基体有比较明显的差别。在（α+β）钛合金中亮条的显微组织有下列一些情况。



(a) 等轴粗晶　　(b) 等轴细晶　　(c) 无可见晶粒

图 10.2-79　同一炉批生产的 TC4 钛合金叶片的不同晶粒组织

1）基体为（α+β）两相组织，亮条处为等轴α相组织。

对显微组织为等轴α单相组织的亮条进行电子和离子探针测定的结果表明，这类亮条中 Al 和 V 含量都比基体低，C、N、O 偏高，Si、Fe 偏低，基本符合出现等轴α单相组织的条件。根据以上所述，可以认为，这类亮条的产生是由于合金成分严重偏析所引起的。

2）基体为细小的（α+β）两相组织，并有一定数量的初生α相，但亮条处的显微组织中α呈长条状的魏氏组织。

由于魏氏组织一般在β转变温度以上加工才能出现，因此，出现这类亮条的原因可能有两个：一个是亮条处化学成分偏析，使其β转变温度下降，因而当基体处于（α+β）两相区时，该处已进入β相区，加工后析出条状α相，形成这类亮条；另一个是，虽然整个合金是在（α+β）两相区加工，但由于加工过程中变形不均匀，局部区域变形程度很大，因而变形热效应使这些区域温度显著上升，超过合金的β转变温度，于是加工后形成魏氏组织，也出现这类亮条。

总之，TC4 钛合金中亮条产生的原因有两个：一是成分偏析；二是加工过程中的变形热效应。

亮条对 TC4 钛合金的性能是有一定影响的，特别是对塑性和高温性能影响较大。持久对比试验结果表明，同样在 64 MPa 应力下，无亮条试样 31 h 后拉断，有亮条试样仅 3 h 多就拉断，寿命相差 10 倍。此外，随着含亮条数量的增加，亮条对性能的影响也增大。

防止 TC4 钛合金中出现亮条的措施如下：

1）熔炼过程中采取各种措施，控制化学成分的偏析在允许范围之内。

2）正确选择锻造热力规范（加热温度、变形程度、变形速度等），以免锻件各处温度因变形热效应而相差太大。

（8）粘模、起皮和切裂

钛合金因黏性大、流动性差和导热性不好，锻造变形过程中表面摩擦力很大，内部变形不均匀明显。因此，对润滑剂、模具预热温度很敏感，稍不注意就会出现粘模（图 10.2-80）、起皮（图 10.2-81、图 10.2-82）和表面撕裂。锻件内部则易出现剪切带（应变线）和切裂（死角切裂）。随着变形程度的增大、变形温度的升高和变形速度的加快，出现这些缺陷的概率越大，程度也越严重。



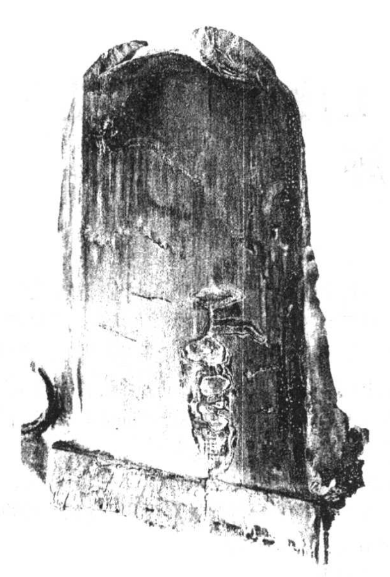


图 10.2-80　TC4合金坯料镀铜后挤压产生粘模和横向裂纹

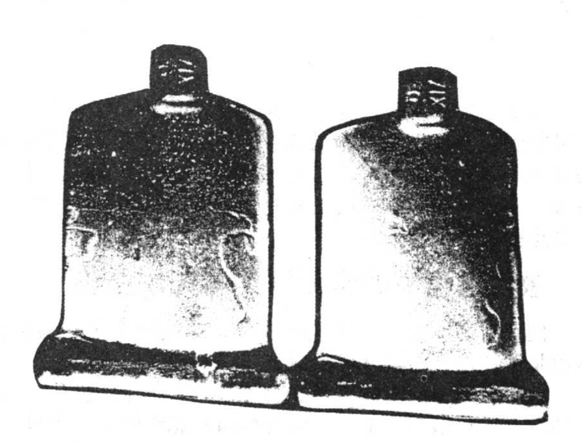


图 10.2-81　叶片模锻件起皮缺陷

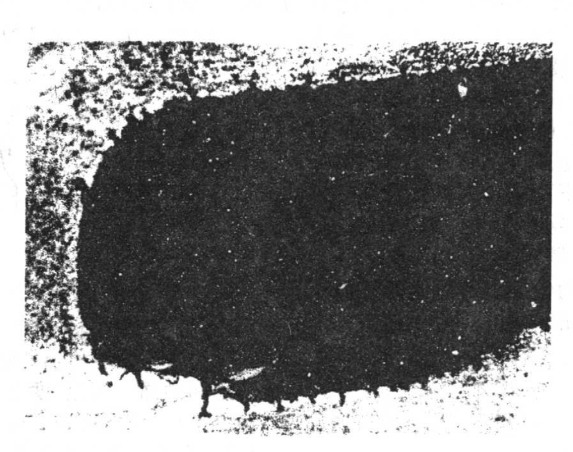


图 10.2-82　飞边处的起皮放大

编写：吕　炎（哈尔滨工业大学）
单德彬（哈尔滨工业大学）



第3章　各主要塑性成形工序中的常见缺陷与控制措施

本章主要从成形角度介绍各主要成形工序中由于工艺不当可能引起的缺陷和控制措施，而不考虑材质因素的影响。锻造生产中常采用的成形工序有镦粗、拔长、冲孔、扩孔、模锻、挤压、摆辗、楔横轧和冲压成形的工序等。本章主要结合这些工序进行分析。

1　镦粗过程中的常见缺陷与控制措施

使坯料高度减小，横截面积增大的成形工序称为镦粗。镦粗是锻压加工中最基本的成形工序。

低塑性坯料镦粗时常易在侧表面产生纵向或呈45°方向的裂纹，锭料镦粗后上、下端常残留铸态组织等。另外，高坯料镦粗时常由于失稳而弯曲，并可能发展成折叠等。

裂纹和残留铸态组织是由于镦粗时的变形不均匀造成的。按变形程度大小大致可分为三个区（图10.3-1）。第Ⅰ区变形程度最小，第Ⅱ区变形程度最大，第Ⅲ区变形程度居中。在常温下镦粗时产生这种变形不均匀的原因主要是工具与坯料端面之间摩擦力的影响，这种摩擦力使金属变形困难，使变形所需的单位压力增高。从高度方向看，中间部分（Ⅱ区）受到的摩擦影响小，上、下两端（Ⅰ区）受到的影响大。在接触面上，由于中心处的金属流动还受到外层的阻碍，故愈靠近中心部分受到的摩擦阻力愈大（即 σ_1、σ_2 大），变形愈困难。由于这样的受力情况，所形成的近似锥形的第Ⅰ区比第Ⅱ区变形困难，一般称为困难变形区。

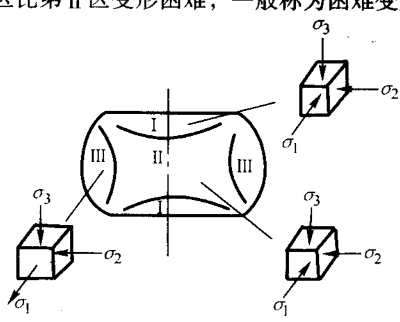


图10.3-1　镦粗时按变形程度分区和各区应力情况

在平板间热镦粗坯料时，产生变形不均匀的原因除工具与毛坯接触面的摩擦影响外，温度不均也是一个很重要的因素。与工具接触的上、下端金属（Ⅰ区）由于温度降低快，变形抗力大，故较中间处（Ⅱ区）的金属变形困难。

由于以上原因，第Ⅰ区金属的变形程度小和温度低，故镦粗锭料时此区铸态组织不易破碎和再结晶，结果仍保留粗大的铸态组织。而第Ⅱ区由于变形程度大和温度高，铸态组织被破碎和再结晶充分，从而形成细小晶粒的锻态组织，而且锭料中部的原有孔隙也被焊合了。

由于第Ⅱ区金属变形程度大，第Ⅲ区变形程度较小，于是第Ⅱ区金属向外流动时便对第Ⅲ区金属作用有压应力，并使其在切向受拉应力。愈靠近坯料表面切向拉应力愈大。当切向拉应力超过材料当时的强度极限或切向变形超过材料允许的变形程度时，便引起纵向裂纹。低塑性材料由于抗剪切的能力弱，常在侧表面产生45°方向的裂纹。

由上述可见，镦粗时的侧表面裂纹和内部组织不均匀都是由于变形不均匀引起的。镦粗时产生这种变形不均匀的原因，一是工具与坯料接触面的摩擦影响；二是与工具接触的部分金属由于温度降低快，σ_s 较高。因此，为保证内部组织均匀和防止侧表面裂纹产生，应当改善或消除引起变形不均的因素或采取合适的变形方法。通常采取以下措施。

（1）使用润滑剂和预热工具

镦粗低塑性材料时常用的润滑剂有玻璃粉、玻璃棉和石墨粉等，为防止变形金属很快地冷却，镦粗用的工具均应预热至200～300℃。

（2）采用凹形毛坯

锻造低塑性材料的大型锻件时，镦粗前将坯料压成凹形（图10.3-2a），可以明显提高镦粗时允许的变形程度。这是因为凹形坯料镦粗时沿径向有压应力分量产生（图10.3-2b、c），对侧表面的纵向开裂起阻止作用。

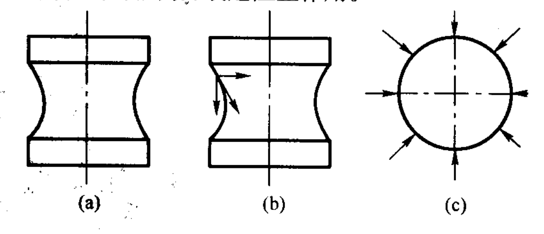


图10.3-2　凹形坯料镦粗时的受力情况

（3）采用软金属垫

热镦粗大型和较大型的低塑性材料锻件时，在工具和坯料之间放置一块温度不低于坯料温度的软金属垫板（图10.3-3a）。由于放置了这种易变形的软垫（一般采用碳素钢），变形金属不直接受到工具的作用。由于软垫的变形抗力较低故先变形并拉着坯料作径向流动，结果坯料的侧面内凹（图10.3-3b），当继续镦粗时软垫直径增大，厚度变薄，温度降低，变形抗力增大，而此时坯料明显地镦粗，侧面内凹消失，呈现圆柱形，再继续镦粗时，可获得程度不太大的鼓形（图10.3-3d）。

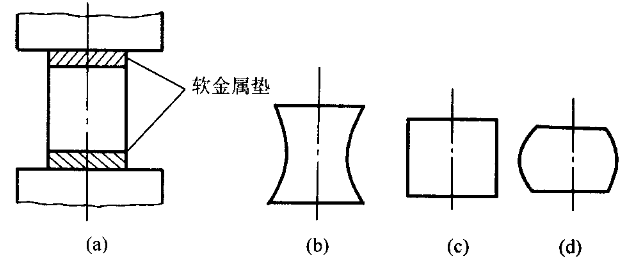


图10.3-3　采用软金属垫板镦粗时坯料变形过程图

由于镦粗过程中坯料侧面内凹，沿侧表面有压应力分量产生，因此产生裂纹的倾向显著降低。又由于坯料上、下端面部分也有了较大的变形，故不再保留铸态组织了。

（4）采用铆镦、叠镦和套环内镦粗

1）铆镦。高速钢坯料镦粗时常因出现鼓形而产生纵向裂纹，为了避免产生纵向裂纹常采用铆镦。铆镦就是预先将坯料端部局部成形，再重击镦粗把内凹部分镦出，然后镦成圆柱形。对于小坯料可先将坯料斜放、轻击，旋转打棱成图10.3-4的形

状。对于较大的坯料可先用擀铁擀成图10.3-5的形状。

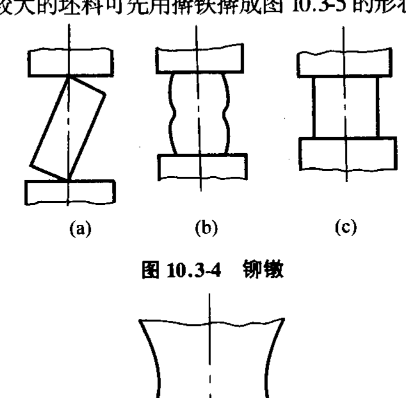


图10.3-4　铆镦

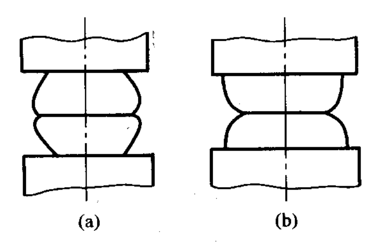


图10.3-5　用擀铁成形后的毛坯

2）叠镦。叠镦主要用于扁平的圆盘锻件，将两件叠起来镦粗，形成鼓形（图10.3-6a），然后各自换成图10.3-6b的形状继续镦粗消除鼓形。叠镦不仅能使变形均匀，而且能显著地降低变形抗力。

图10.3-6　叠镦

3）在套环内镦粗。这种镦粗方法是在坯料的外圈加一个碳钢外套（图10.3-7），靠套环的径向压力来减小由于变形不均而引起的附加拉应力，镦粗后将外套去掉。这种锻造方法主要用于镦粗低塑性的高合金钢。

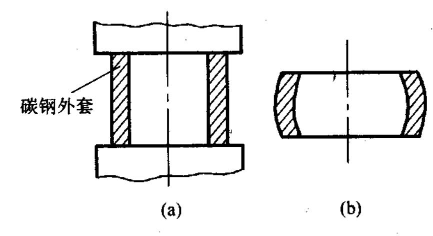


图10.3-7　套环内镦粗

（5）采用反复镦粗拔长的锻造工艺

反复镦粗拔长工艺有单向（轴向）反复镦拔、十字反复镦拔、双十字反复镦拔等多种变形方法。其共同点是使镦粗时的困难变形区在拔长时受到变形，使整个坯料各处变形都比较均匀。这种锻造工艺在锻造高速工具钢、Cr12型模具钢、铝合金和钛合金时应用较广（见第2章）。

当坯料高度超过其直径的3倍时，镦粗时容易失稳而弯曲，尤其当毛坯端面与轴线不垂直，或毛坯有弯曲，或毛坯各处温度和性能不均，或砧面不平时更容易产生弯曲。弯曲了的毛坯如不及时校正而继续镦粗则要产生折叠。

为防止镦粗时产生纵向弯曲，圆柱体毛坯高度与直径之比不应超过2.5～3。在2～2.2的范围内更好。对于平行六面体毛坯，其高度与较小基边之比应小于3.5～4。

镦粗前毛坯端面应平整，并与轴心线垂直。

镦粗前毛坯加热温度应均匀，镦粗时要把毛坯围绕着它的轴心线不断地转动，毛坯发生弯曲时必需立即校正。

2　拔长过程中的常见缺陷与控制措施

使坯料横截面积减小而长度增加的成形工序称为拔长。

拔长可分为矩形截面坯料的拔长、圆截面坯料的拔长和空心坯料的拔长三类。拔长过程中常见的缺陷和控制措施按三类分别介绍如下。

2.1　矩形截面坯料的拔长

在平砧上拔长锭料和低塑性材料（如高速钢等）的钢坯时，在坯料外部常常产生表面的横向裂纹和角裂（图10.3-8a、b），在内部常产生组织和性能不均匀，内部的对角线裂纹（图10.3-8c）和横向裂纹（图10.3-8d）等，另外，还可能产生表面折叠和端凹等。

1）侧表面裂纹。侧表面裂纹是由于拔长时送进量和压下量过大造成的。矩形截面坯料拔长时，其内部变形情况与镦粗很近似，当送进量和压下量很大时，轴心部分变形大，于是侧表面沿轴向受拉应力作用，当拉应力足够大时，便可能引起开裂，主要控制措施是适当控制压下量。

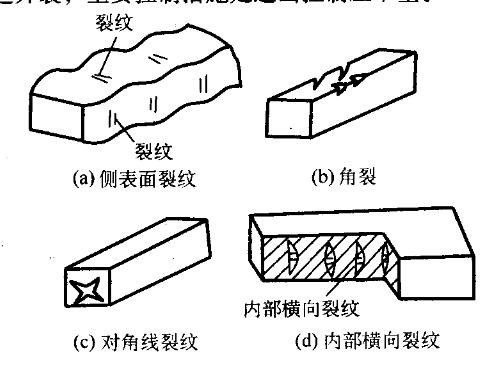


图10.3-8　矩形截面坯料拔长时产生的裂纹

2）上、下表面横向裂纹。上、下表面横向裂纹通常发生在变形区的前后端，这是由于轴心区金属变形大，拉着上、下表层的金属轴向伸长，使上、下表层金属沿轴向受附加拉应力作用，而变形区的前、后端由于受砧面摩擦阻力的影响小，故此处的拉应力和拉应变均较大（图10.3-9），故常易在此处引起表面横向裂纹。拔长低塑性钢料或铜合金等与砧面摩擦系数大的材料时，较易产生此类裂纹。主要控制措施是：改善润滑条件，加大锤砧转角处的圆角，必要时沿砧面的前后方向作成一定的凸弧或斜度（图10.3-10），以利

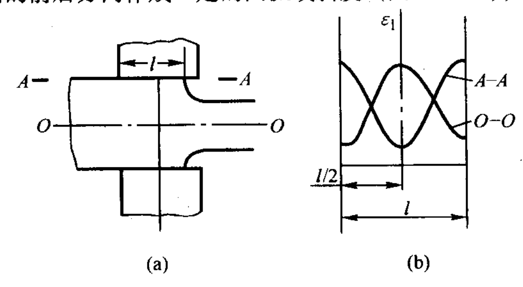


图10.3-9　拔长时的变形分布

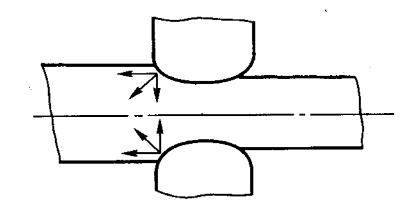


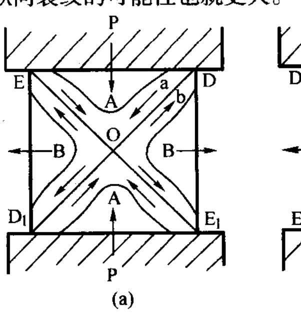
图10.3-10　凸弧形砧子拔长



于表层金属沿轴向流动。

3）角裂。矩形截面坯料拔长，送进量较大时，由于轴心区金属变形大，拉着表层金属沿轴向伸长，而前后两外端不变形部分的存在更加剧了该轴向的附加拉应力，尤其在边角部分，由于冷却较快，塑性降低，更易开裂。高合金工具钢和某些耐热合金拔长时，常易产生角裂。主要控制措施是：操作时需勤倒角，通过倒角变形，消除角处的附加拉应力。

4）对角线裂纹。拔长高合金工具钢时，当送进量较大，并且在坯料同一部位反复重击时，常易沿对角线产生裂纹（图10.3-8c和图10.2-12），一般认为其产生的原因是：坯料被压缩时，沿横截面上金属流动的情况如图10.3-11所示，A区（困难变形区）的金属带着靠着它的a区金属向轴心方向移动，B区的金属带着靠近它的b区金属向增宽方向流动，因此，a、b两区的金属向着两个相反的方向流动，当坯料翻转90°再锻打时，a、b两区相互调换了一下（图10.3-11b），但是其金属的流动仍沿着两个相反的方向，因而DD_1和EE_1，便成为两部分金属最大的相对移动线，在DD_1和EE_1线附近金属的变形最大。当多次反复地锻打时，a、b两区金属流动的方向不断改变，其剧烈的变形产生了很大的热量，使得两区内温度剧升，此处的金属很快地过热，甚至发生局部熔化现象，因此在切应力作用下，很快地沿对角线产生破坏。材料愈硬，变形抗力愈大（如高速钢、Cr12型钢等），或坯料质量不好，锻件加热时间较短，内部温度较低，或打击过重时，由于沿对角线上金属流动过于剧烈，产生严重的加工硬化现象，这也促使金属很快地沿对角线开裂。拔长时，若送进量过大，沿长度方向流动的金属减少，沿横截面上金属的变形就更为剧烈，尤其在同一处反复锤击次数愈多时，沿对角线产生纵向裂纹的可能性也就更大。



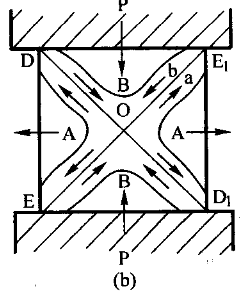


图10.3-11　拔长时坯料横截面上金属流动的情况

由以上可见，送进量较大时，坯料可以很好地锻透，而且可以焊合坯料中心部分原有的孔隙和微裂纹，但送进量过大也不好，因为l/h过大时，产生外部横向裂纹和内部对角线裂纹的可能性也增大。

5）内部横向裂纹。在拔长大锭料时，如进料比很小，坯料内部的变形也是不均匀的，变形情况如图10.3-12所示，上部和下部变形大，中部变形小，变形主要集中在上、下两部，心部分原有的缺陷（如疏松等）进一步扩大，易产生横

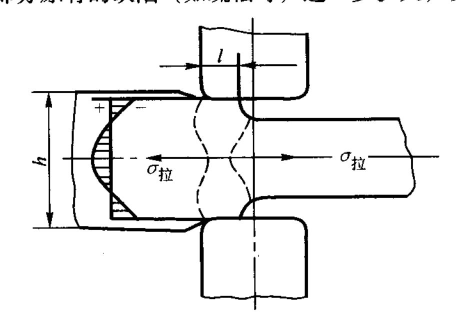


图10.3-12　小送进量拔长时的变形和应力情况

向裂纹（图10.3-8d）

对拔长过程中常产生的上述缺陷，一般采取如下控制措施。

① 正确地选择送进量。根据试验和生产经验，一般认为$l/h=0.5\sim0.8$时，相对讲较为合适。为获得较为均匀的变形，使锻件锻后的组织和性能均匀些，拔长操作时，应使前后各遍压缩时的进料位置相互错开，图10.3-13是前后两遍的进料位置完全重叠的情况，图10.3-14是前后两遍的进料位置相互错开的情况。随进料位置的交错，两次压缩的最大变形区和最小变形区交错开了。

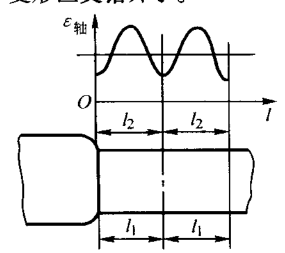


图10.3-13　拔长时前后两遍进料位置完全重叠时的变形分布

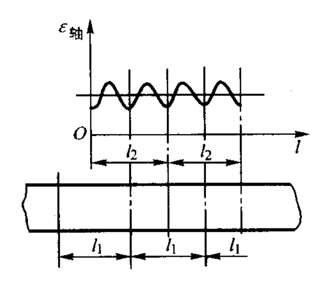


图10.3-14　拔长时前后两遍进料位置相互错开时的变形分布

② 针对锻件的具体特点，采用适当的操作方法和合适的工具　为防止前面所述的裂纹产生，拔长时应针对锻件的具体特点，采用适当的操作方法。例如拔长高速钢时，应采用“两轻一重”的操作方法（即始锻和接近终锻温度时应轻击，在900～1 050℃钢材塑性较好时，应予重击，以打碎钢中大块的碳化物），并避免在同一处反复锤击。拔长低塑性钢材和铜合金时，锤砧应有较大的圆角，或沿送进方向做成一定的凸弧和斜度（图10.3-10）。

③ 在大型锻件锻造中采用宽砧、大送进量锻造法或有效的成形新工艺　在大型锻件的锻造中，为保证锻件中心部分能够锻透，拔长时一般采用宽砧、大送进量，用走扁方的方法进行锻造，也可采用表面降温锻造法（或称中心压实法）来生产一些重要的轴类锻件。这时，变形主要集中在中心部分，并且中心部分金属处于高温和高静水压的三向压应力状态，使疏松、气孔、微裂纹等得以焊合，使锻件内部质量有较大提高。

拔长过程中常易产生的另一些质量问题是表面折叠、端面内凹和倒角时对角线裂纹等。

图10.3-15是一种表面折叠的形成过程，表面折叠是由于送进量很小、压下量很大，上、下两端金属局部变形引起的。避免产生这种折叠的对策是增大送进量，使两次送进量

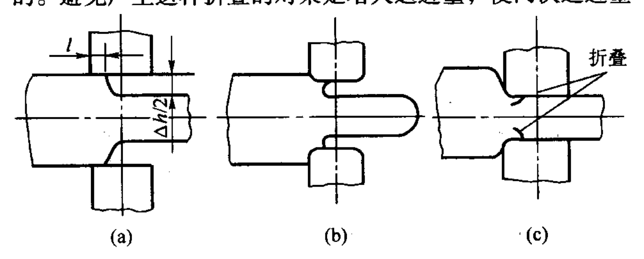


图10.3-15　表面折叠形成过程



与单边压缩量之比大于 1～1.5$\left(\text{即}\frac{2l}{\Delta h}>1\sim1.5\right)$。

图 10.3-16 是另一种折叠，是由于拔长时压缩得太扁，翻转 90°立起来再压时，由于坯料弯曲并发展而形成的。避免产生这种折叠的控制措施是减小压缩量，使每次压缩后的锻件宽度与高度之比小于 2～2.5，即（a_n/h_n）<2～2.5。

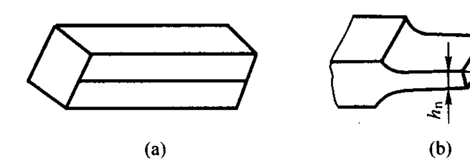


图 10.3-16　侧表面折叠

端面内凹（图 10.3-17）也是由于送进量太小、表面金属变形大、轴心部分金属未变形或变形较小而引起的。防止的控制措施是保证有足够的压缩长度和较大的压缩量，端部所留的长度应满足下列规定：

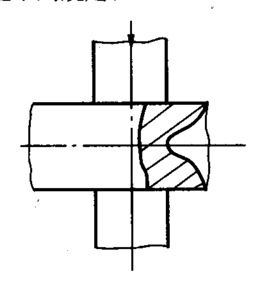


图 10.3-17　端面内凹

对矩形坯料（图 10.3-18）

当$\frac{B}{H}>1.5$时，$A>0.4B$

当$\frac{B}{H}<1.5$时，$A>0.5B$

对圆截面坯料（图 10.3-18b），$A>0.3D$

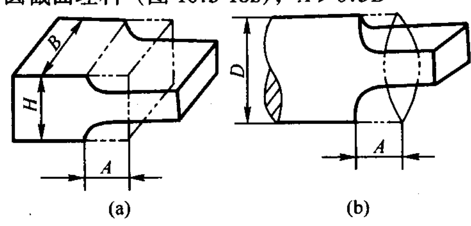


图 10.3-18　端部拔长时的坯料长度

倒角时的对角线裂纹是由于倒角时不均匀变形和附加拉应力引起的，常常在打击较重时产生。因此，倒角时应当锻得轻些。对低塑性材料最好在圆形砧内倒角（10.3-19a、b）。

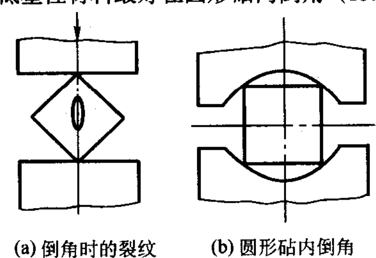


图 10.3-19　倒角

2.2　圆截面坯料的拔长

用平砧拔长圆截面坯料时，若压下量较小，且一边旋转一边锻打，常易在锻件内部产生纵向裂纹（图 10.3-20 和图 10.2-13）。其原因是：①工具与金属接触时，首先是一条线，然后逐渐扩大（图 10.3-21），接触面附近的金属受到的压应力大，故这个区（*ABC* 区）首先变形，但是 *ABC* 区很快成为困难变形区，其原因是，随着接触面的增加，工具的摩擦影响增大，而且温度降低较快，故变形抗力增加，因此，*ABC* 区就好像一个刚性楔子。继续压缩时（但 Δh 还不太大时），通过 *AB*、*BC* 面，沿着与其垂直的方向，将应力 σ_H 传给坯料的其它部分，于是坯料中心部分便受到合力 σ_R 的作用。②由于作用力在坯料中沿高度方向分散地分布，上、下端的压应力$|\sigma_3|$大，于是变形主要集中在上、下部分，轴心部分金属变形很小（图 10.3-22），因而变形金属便主要沿横向流动，并对轴心部分金属作用以附加拉应力。

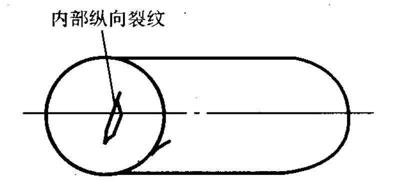


图 10.3-20　平砧拔长圆截面坯料时的纵向裂纹

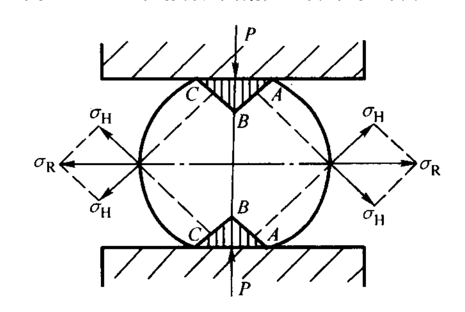


图 10.3-21　平砧小压下量拔长时圆截面坯料的受力情况

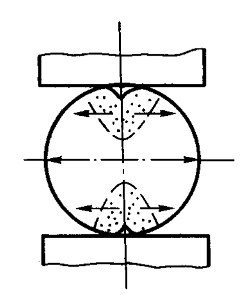


图 10.3-22　变形不均在坯料中心引起的附加拉应力

附加拉应力和合力 σ_R 的方向是一致的。愈靠近轴心部分受到的拉应力愈大。在此拉应力的作用下，使坯料中心部分原有的孔隙、微裂纹继续发展和扩大。当拉应力的数值大于金属当时的强度极限时，金属就开始破坏，产生纵向裂纹。

拉应力的数值与相对压下量 $\Delta h/h$ 有关，当变形量较大时（$\Delta h/h>30\%$），困难变形区的形状也改变了（图 10.3-23），这时与矩形断面坯料在平砧下拔长相同。轴心部分处

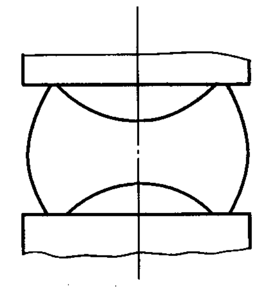


图 10.3-23　平砧大压下量拔长时坯料的变形情况



于三向压应力状态。

因此，圆截面坯料用平砧直接由大圆到小圆的拔长是不合适的。为保证锻件的质量和提高拔长的效率，应当采取措施限制金属的横向流动和防止径向拉应力的出现。生产中常采用下面两种方法。

1）在平砧下拔长时，先将圆截面坯料压成矩形，再将矩形截面坯料拔长到一定尺寸，然后再压成八边形，最后压成圆形（图10.3-24），其主要变形阶段是矩形截面坯料的拔长。

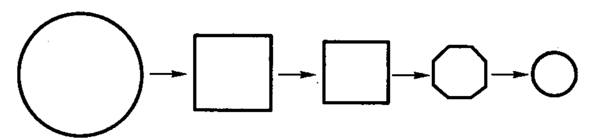


图10.3-24　平砧拔长圆截面时截面变形过程

2）在型砧（或摔子）内进行拔长。它是利用工具的侧面压力限制金属的横向流动，迫使金属沿轴向伸长。在水压机型砧内拔长与平砧相比可提高生产率20%～40%，在型砧（或摔子）内拔长时的应力状态可以防止内部纵向裂纹的产生。

拔长用的型砧有圆形型砧和V形型砧两类。型砧的形状对拔长效率、锻透深度、金属的塑性和表面质量有很大影响，应合理选用。

2.3　空心件拔长

空心件拔长一般叫芯轴拔长。芯轴拔长是一种减小空心坯料外径（壁厚）而增加其长度的锻造工序，用于锻制长筒类锻件（图10.3-25）。

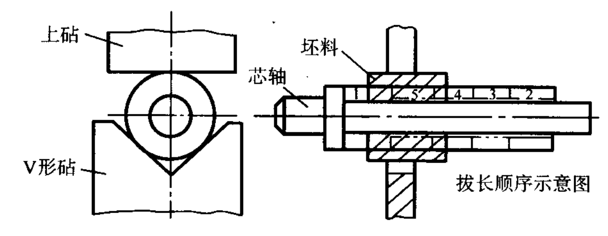


图10.3-25　芯轴拔长

芯轴拔长过程中的主要缺陷是孔内壁裂纹（尤其是端部孔壁）和壁厚不均。

裂纹产生的原因是：经一次压缩后内孔扩大，转一定角度再一次压缩时，由于孔壁与芯轴间有一定间隙，在孔壁与芯轴上、下端压靠之前，内壁金属由于弯曲作用受切向拉应力，如图10.3-26所示。另外，内孔壁长时间与芯轴接触，温度较低，塑性较差，当应力值或伸长率超过材料当时允许的指标时便产生裂纹。

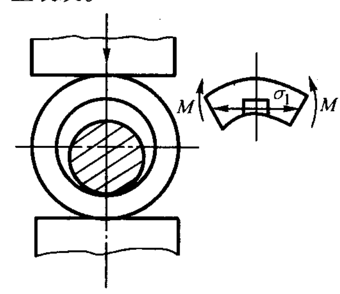


图10.3-26　芯轴拔长时内壁金属的受力情况

变形区金属切向流动的愈多，即内孔增加愈大时，愈易产生孔壁裂纹。因此在平砧上拔长时，空心件壁厚 t 与芯轴直径 d 之比（$\frac{t}{d}$）愈小（即孔壁愈薄）时愈易产生裂纹。采用V形型砧，可以减小孔壁裂纹产生的倾向。

在芯轴上拔长时空心件端部更容易产生孔壁裂纹的原因：①由于芯轴对变形区金属摩擦阻力的作用，空心件端部呈如图10.3-27所示的形状，下一次压缩时端部孔壁与芯轴间的间隙比其他部分大；②由于端部的外侧没有外端，故此处被压缩时，切向拉应力很大；③端部金属与冷空气长时间接触，降温较大，塑性较低。

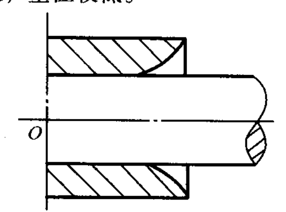


图10.3-27　芯轴拔长时端部金属的变形情况

为防止空心件拔长的缺陷，一般采取如下控制措施：

1）为提高拔长效率和防止孔壁产生裂纹，对于厚壁锻件（$\frac{t}{d}>0.5$），一般采用上平砧和下V形型砧；对于薄壁空心锻件（$\frac{t}{d}\leqslant 0.5$），上、下均采用V形型砧。在锤上拔长厚壁锻件时，有时为了节省V形型砧的制造费用等，上、下都用平砧，但必须先锻成六方形再进行拔长，达到一定尺寸后再锻成圆形。

2）为了防止孔壁裂纹的产生，锻件两端部锻造终了的温度应比一般的终锻温度高100～150℃；锻造前芯轴应预热到150～250℃。

3）为使锻件壁厚均匀和端部平整，坯料加热温度应当均匀，操作时每次转动的角度应一致。

3　冲孔过程中的常见缺陷与控制措施

在坯料上锻制出透孔或不透孔的工序称为冲孔。

冲孔分为开式冲孔和闭式冲孔。开式冲孔又分为实心冲子冲孔和空心冲子冲孔。本节介绍实心冲子开式冲孔过程中常见的缺陷和控制措施。

冲孔过程中的主要缺陷是“走样”（图10.3-28）、侧表面裂纹、内孔圆角处裂纹（图10.3-29）和孔冲偏等。

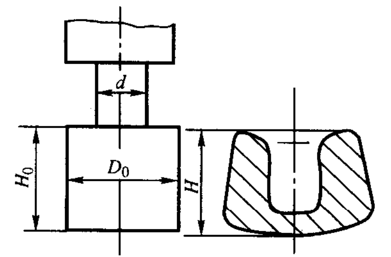


图10.3-28　冲孔时的“走样”现象

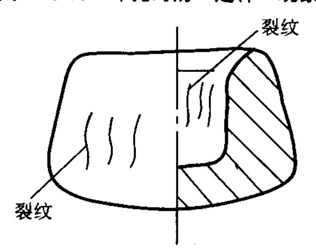
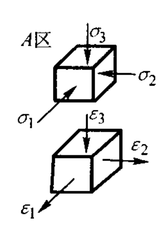


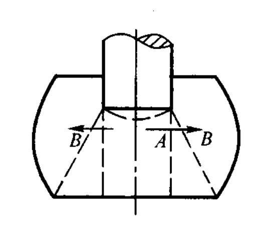
图10.3-29　冲孔时的裂纹



所谓“走样”是指开式冲孔时坯料高度减小，外径上小下大，而且下端面突出，上端面凹进等现象。“走样”和裂纹等缺陷是与冲孔时的受力和变形情况有关的。

冲孔时冲头下部的 A 区金属是直接受力区（图 10.3-30)，其周围的 B 区金属是间接受力区。A 区金属的变形可看做是环形金属包围下的镦粗，A 区金属被压缩后高度减小，横截面积增大，向四周径向外流，但受到环壁的限制，故处于三向受压的应力状态，其应力应变简图如图 10.3-30 所示。B 区之受力和变形主要是由于 A 区的变形引起的。A 区金属径向外流时，使 B 区金属径向受压，切向受拉，在高度方向，A 区金属向下流动时，借助剪切应力对 B 区金属有一个拉缩作用。愈靠近内侧受拉缩愈严重。冲孔时$\frac{D}{d}$愈小，即 B 区愈薄时，拉缩和走样愈显著。但是，如果 B 区很厚，即$\frac{D}{d}$很大时，B 区外侧的 σ_1、σ_2、σ_3 均很小，可能处于弹性状态，仅内侧发生塑性变形，这时 B 区的内侧金属径向被压缩，高度可能增大，犹如打硬度一样，“走样”很小。





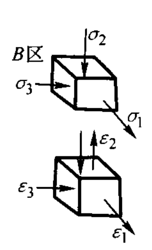


图 10.3-30 开式冲孔时的应力应变简图

低塑性材料开式冲孔时，外侧表面裂纹的产生就是由于 A 区金属向外流动时 B 区的外径被迫地扩大，使外侧金属受到切向拉应力，当超过金属当时的强度极限时，便产生裂纹破坏。冲孔时$\frac{D}{d}$愈小，即 B 区愈薄时，最外层金属受到的切向拉应力和拉应变愈大，故愈易产生裂纹。

由以上分析可见，开式冲孔时$\frac{D}{d}$太小是不好的，会产生“走样”过大和裂纹，故生产中常取$\frac{D}{d}=3$，也有些厂取$\frac{D}{d}\geqslant(2.5\sim3)$。

冲孔时内孔圆角处的裂纹是由于此处温度降低较多，塑性较低，加之冲子一般都有锥度，当冲子往下运动时，此处便被胀裂。因此，冲子的锥度不宜过大，当冲低塑性材料时，如 Cr12 型钢，不仅要求冲子锥度较小，而且要经过多次加热逐步冲成。

大型锻件在水压机上冲孔时，当孔径大于 ϕ450 mm 时，一般采用空心冲头冲孔（图 10.3-31)，这样可以减小 B 区外层金属的切向拉应力，避免产生侧表面裂纹，并能除掉锭料中心部分质量不好的金属。

冲孔过程中的另一个问题是孔冲偏。引起孔冲偏的原因很多，如冲子放偏，环形部分金属性质不均，冲头各处的圆角、斜度不一致等，均可使孔冲偏。原坯料愈高，愈容易冲偏。因此冲孔时，坯料高度 H_0 一般小于直径 D_0，在个别情况下，采用 $H_0/D_0\leqslant1.5$。

冲头的形状对冲孔时金属的流动有很大影响，例如锥形冲头和椭圆形冲头均有助于减小冲孔时的“走样”，但这样的冲头很容易将孔冲歪，因此，自由锻冲孔时，冲头一般用平头的，在转角处取不太大的圆角。

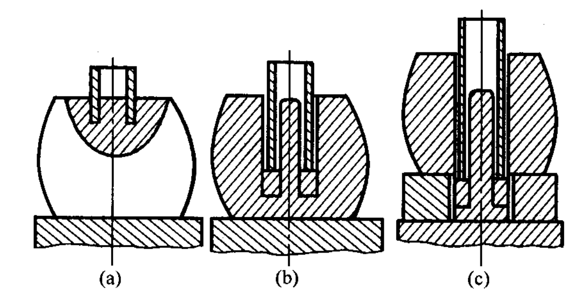


图 10.3-31 空心冲头冲孔过程示意图

4 扩孔过程中的常见缺陷与控制措施

减小空心坯料壁厚而增加其内、外径的锻造工序叫扩孔。

常用的扩孔方法有冲子扩孔（图 10.3-32)、芯轴扩孔（又叫马杠扩孔，见图 10.3-33)，辗压扩孔（图 10.3-34)、楔扩孔、液压扩孔和爆炸扩孔等。

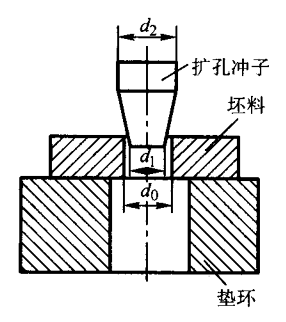


图 10.3-32 冲子扩孔

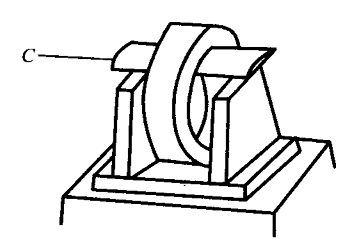


图 10.3-33 芯轴扩孔

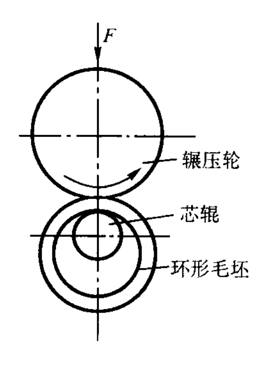


图 10.3-34 辗压扩孔

从变形区的应变情况看，扩孔可分为两组。第一组类似拔长的变形方式，如马杠扩孔（芯轴扩孔）和辗压扩孔；第二组类似胀形的变形方式，如冲子扩孔、楔扩孔、液压扩孔和爆炸扩孔等。



本节介绍冲子扩孔、液压扩孔和辗压扩孔过程中常见的缺陷和控制措施。

1）冲子扩孔。冲子扩孔一般用于 $\frac{D}{d_2}>1.7$ 和 $H\geqslant 1.125D$ 的壁不太薄的锻件，D 为锻件外径，H 为锻件高度，d_2 为扩孔冲子的直径。

冲子扩孔时的主要缺陷是裂纹和壁厚不均匀。

冲子扩孔时由于坯料切向受拉应力，容易胀裂，故每次扩孔量 A 不宜太大，可参考表 10.3-1 选用。

表 10.3-1　每次允许的扩孔量

d_2/mm	A/mm	d_2/mm	A/mm
30～115	25	120～270	30

冲子扩孔时锻件的壁厚受多方面因素影响，例如，坯料壁厚不等时，将首先在壁薄处变形；如果原始壁厚相等，但坯料各处温度不同，则首先在温度较高处变形；如果坯料上某处有微裂纹等缺陷，则将在此处引起开裂。总之，冲子扩孔时，变形首先在薄弱处发生，因此冲子扩孔时，如果控制不当可能引起壁厚差较大。但是如果正确利用上述因素的影响规律也可能获得良好的效果。例如，扩孔前将坯料薄壁处沾水冷却一下，以提高此处的变形抗力，将有助于减小扩孔后的壁厚差。

2）液压扩孔。液压扩孔目前在护环的胀形强化中应用较多。

液压扩孔时的主要缺陷是锻件外形呈喇叭口畸形、胀裂和尺寸超差等。其产生的原因和防止对策见第 4 章第 3 节。

3）辗压扩孔。辗压扩孔主要用于辗扩轴承套圈、火车轮箍、齿圈和法蓝等环形锻件。

辗压扩孔过程中的主要缺陷是尺寸超差和锻件端面内凹等。

坯料体积、辗压变形量、辗扩前预成形坯的尺寸等对辗扩件的尺寸精度有较大影响。锻件的外径尺寸由辗压终了时辗压轮、导向辊和信号辊三者的位置决定，应予以准确控制。为了保证辗压件的质量，根据生产实践经验，导向辊与机床中心线夹角应大于 65°，信号辊与机床中心线夹角应大于 55°。

在径向辗扩机上扩孔时，由于金属变形具有表面变形特点常易产生锻件端面内凹（图 10.3-35），用小压下量辗压厚壁环形件时内凹更明显。因此，最后一道次辗压时应有足够的变形量。若采用径向－轴向辗环机则可以较好地解决内凹缺陷，其特点是用一对径向辗压轧辊和一对轴向辗压轧辊分别辗压环的壁厚和高度（图 10.3-36），可以得到端面平直的锻件并可减少模具更换的次数。

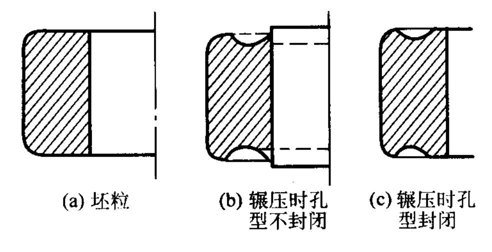


图 10.3-35　辗压扩孔时的端面凹坑

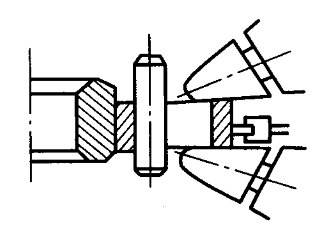


图 10.3-36　径向—轴向辗压示意图

5　模锻过程中的常见缺陷与控制措施

模锻成形过程中的主要缺陷有折叠、充不满、错移、欠压和轴线弯曲等。

折叠是金属变形过程中已氧化过的表层金属汇合在一起而形成的，在制坯工步和模锻工步都可能产生折叠，它与原材料和坯料的形状、模具的设计、成形工序的安排、润滑情况及锻造的实际操作等有关，模锻时各种折叠形成的原因和控制措施见第 1 章第 6 节。

模锻时引起充不满的原因可能是：在模膛深而窄的部分由于阻力大不易充满；在模膛的某些部分（例如叉形件的内端角），由于金属很难流到而不易充满；制坯时某些部分坯料体积不足，或操作时由于放偏，某部分金属量不足引起充不满等。下面只分析研究前两种情况。

1）带高肋的锻件模锻时产生的充不满情况（如图 10.3-37 所示）。

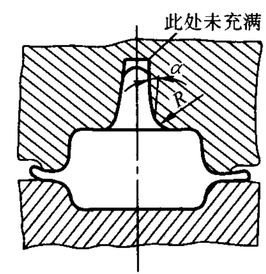


图 10.3-37　高筋锻件

模锻时，在筋部由于摩擦阻力、模壁引起的垂直分力和此处金属冷却较快、变形抗力大等原因，常常产生充不满的情况。因此，为使肋部充满，一方面应设法减小金属流入肋部的阻力，另一方面应加大桥口部分的阻力，迫使金属向筋部流动，在设计预锻模膛时，一般采取下列措施：

① 增大过渡处的圆角半径 R。

② 将带筋的部分放在上模。

③ 增大桥口部分的阻力，即加大 $b/h_飞$ 值。

但是，圆角半径 R 过大，要增大加工余量；桥口部分阻力过大，上下模不能打靠，甚至可能造成桥口被打塌等。因此，这些措施的效能是有一定限度的。

为解决这一矛盾，在锤上模锻时先进行预锻。设计预锻模膛时的主要出发点是减少终锻时金属充填筋部模膛的阻力。一般措施是在难充满的部分增大模膛的斜度（图 10.3-38）。这样，预锻后的坯料终锻时，坯料和模壁间有了间隙，消除了模壁对金属的摩擦阻力和由模壁引起的向下垂直分力，使金属容易向上流动充满模膛。但是，由于增大了斜度，预锻模膛本身便不易被充满。为了使预锻模膛也能被充满，必需增大圆角半径。但圆角半径也不宜增加过大，因为过大了不利于终锻时充满模膛，甚至终锻时可能在此处将金属啃下并压入锻件内而形成折叠，一般取 $R_1=1.2R+3$ mm。

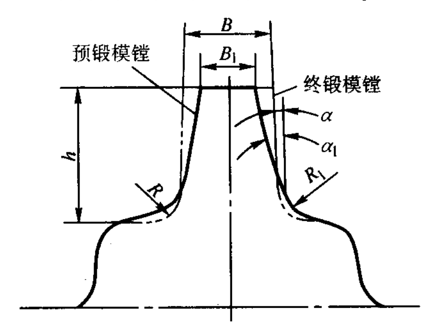


图 10.3-38　高筋锻件的预锻模膛



如果难充填的部分较大，B 较小，预锻模膛的拔模斜度不宜过大，否则预锻后 B_1 很小，冷却快，终锻时反而不易充满模膛。这时可设计成如图 10.3-39 所示的形状。

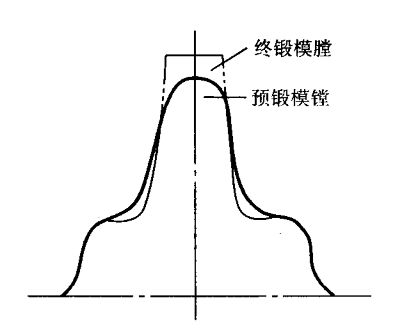


图 10.3-39　高筋锻件的预锻模膛

关于锤上和热模锻压力机上预锻模膛的设计，另一种设计方法，如图 10.3-40 所示。其特点是适当减小预锻模膛的高度（$\delta=3\sim8$ mm），但保证顶端的水平尺寸和模膛斜度与终锻模膛的相应部分一致，例如 $a=a'$等。当然这时 $c'<c$。具体形状如图 10.3-40a 所示。对于很薄的筋，如果端部圆角又很小，为使圆角处能较好地充满，应把端部设计成圆弧，如图 10.3-40b 所示。这一方案的实质是分两步成形：预锻时先成形上部分，终锻时该分仅作刚性平移（当然方案 b 在终锻时端部尚需局部镦粗），金属与模壁间始终存在着一间隙（在完全充满之前），从而能在较大程度上减小终锻时金属的流动阻力。

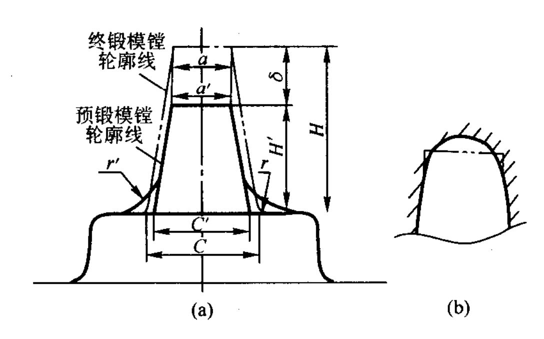


图 10.3-40　高筋锻件的预锻模膛

2）叉形锻件模锻时，常常在内端角处产生充不满的情况（图 10.3-41）。

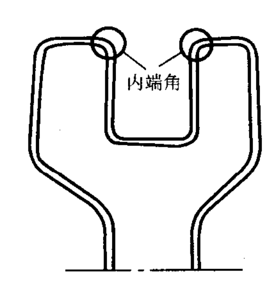


图 10.3-41　叉类锻件内端角充不满

将坯料直接进行终锻时，金属的变形流动情况如图 10.3-42 所示。沿横向流动的金属先水平外流，与模壁接触后，部分金属转向内角处流动。由变形流动的情况决定了内角部分是难充满的地方，之所以在内端角部分不易充满，还由于此处被排出的金属除沿横向流入模膛外，有很大一部分沿轴向流入飞边槽（图 10.3-43），造成内端角处金属量不足所致。

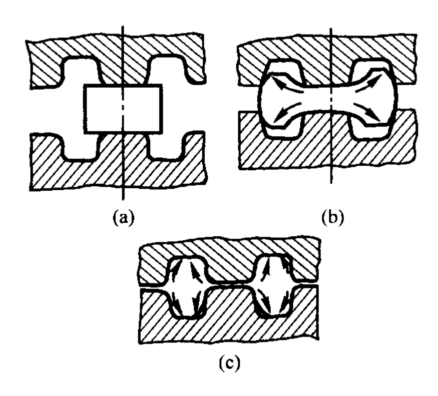


图 10.3-42　叉类锻件金属的变形流动

因此，为避免这种缺陷，终锻前制坯时应当先将叉形部分劈开。这样，终锻时就会改善金属的流动情况，以保证内端角处充满。

在锤上模锻时，需先进行预锻。为便于金属沿横向流入模膛，预锻模膛应设计成如图 10.3-44 所示的形状。当需劈开部分窄而深时，可设计成如图 10.3-45 所示的形状。为限制金属轴向大量流入飞边槽，在模具上应设计有制动槽（见图 10.3-43）。

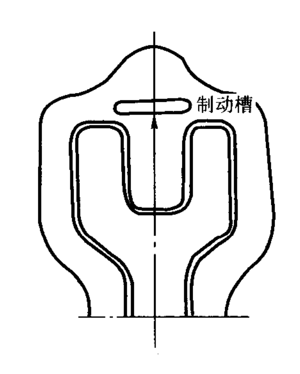


图 10.3-43　轴向流动和制动槽

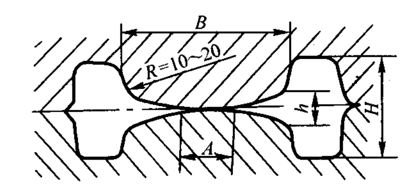


图 10.3-44　叉形部分劈料台

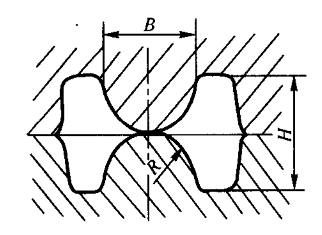


图 10.3-45　叉形部分劈料台

3）带枝芽的锻件模锻时，常常在枝芽处充不满。

该类锻件模锻时在枝芽处充不满的原因通常是此处金属量不足。因此，预锻时应在该处聚集足够的金属量。为便于金属流入枝芽处，预锻模膛的枝芽形状应适当简化，与枝芽连接处的圆角半径适当增大，必要时可在分模面上设阻力沟，加大预锻时流向飞边的阻力，如图 10.3-46 所示。

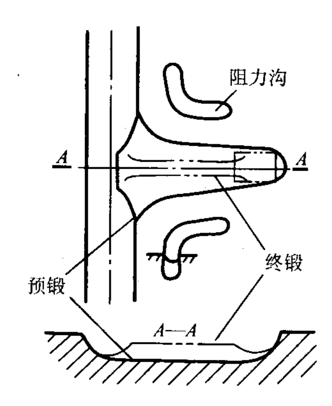


图 10.3-46　带枝芽锻件的预锻模膛

预锻后的坯料进行终锻，能减少终锻模膛的磨损，提高整个锻模的寿命。如果仅为此而增加预锻，这时的预锻模膛设计基本上和终锻模膛一样，只是在模膛的凸圆角处及分模面剖口的圆角处，将预锻模膛的圆角半径作得比终锻模膛的圆角半径略大一些（增大 1～2 mm），以免在终锻时在该处形成折叠。

锻件上形状复杂且较高的部分如因特殊情况需放在下模时，由于下模较深处易积聚氧化皮，致使锻件在该处“缺肉”，如图 10.3-47 所示的曲轴，模具该处应加深 2 mm。对某些具有高筋的锻件，其终锻模膛在相应部位应该有排气孔，以保证筋部充满。

模锻时还可能产生错移、欠压和轴线弯曲等缺陷，不再一一介绍了。

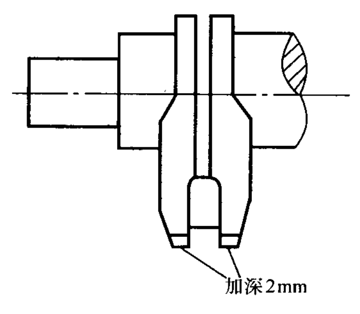


图 10.3-47　曲轴锻件的局部加厚

6　挤压过程中的常见缺陷与控制措施

挤压过程常见的缺陷有：挤压缩孔、“死区”剪裂和折叠、纵向裂纹、横向裂纹、挤压件弯曲、由拉缩引起的截面尺寸不符、残余应力大以及粗晶环等。

挤压缩孔（图 10.3-48）是挤压矮坯料时常易产生的缺陷，这时由于 B 区金属的轴向压应力小，故当 A 区金属往凹模孔流动时便拉着 B 区金属一道流动，使其上端面离开冲头并呈凹形，再加上径向压应力的作用便形成这样的缩孔。防止的措施是正确控制压余的高度，必要时可增加反向推力。

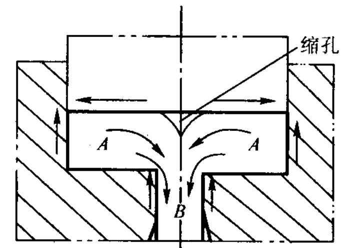


图 10.3-48　挤压缩孔

挤压时，如果摩擦系数大和模具温度较低时，常在凹模底部形成一个难变形区，通常称为“死区”。由于该区金属不变形，而与其相邻的上部金属有变形和流动，于是便在交界处发生强烈的剪切变形，严重时将引起金属剪裂，即“死区”裂纹（图 10.3-49），有时可能由于上部金属的大量流动带着“死区”金属流动而形成折叠，如图 10.3-50 所示。

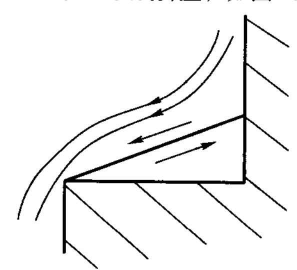


图 10.3-49　“死区”附近的金属流动和受力情况

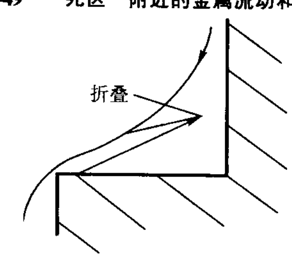


图 10.3-50　折叠的形成情况

应当指出，在与“死区”交界处产生的强烈剪切变形对挤压件的组织和性能有重要影响，有关这方面的内容详见文献［18］。

防止“死区”剪裂和折叠的措施是改善润滑条件和正确控制模具和坯料的温度，还可以采用带锥角的凹模，锥角的作用在于使作用力在平行于锥面的方向有一个分力，该分力与摩擦力的方向相反（图 10.3-51）。从而有利于金属的变形和流动。根据不同的条件可以通过计算确定一个合适的锥角，以抵消摩擦的影响。

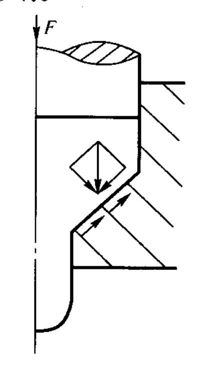


图 10.3-51　凹模锥角改善金属流动的影响图

在挤压筒内尽管可能产生挤压缩孔和“死区”剪裂等缺陷，但变形金属处于三向受压的应力状态，能使金属内部的微小裂纹得以焊合，使杂质的危害程度大大减小，尤其当挤压比较大时，这样的应力状态对提高金属的塑性是极为有利的。但是在挤压制品中常常产生各种裂纹（图 10.3-52）以及挤压件的弯曲、拉缩和残余应力等。这些缺陷的产生与筒内的不均匀变形（主要是“死区”引起的）有很大关系，但更重要的是凹模孔口部分的影响。

挤压时，变形金属在经过孔口部分时，由于摩擦的影响，表层金属流动慢，轴心部分流动快，使筒内已经形成的不均匀变形进一步加剧，内外层金属流动速度有差异，但两者又是一个整体，因此必然要有相互平衡的内力（即附加应



力)，外层受拉应力，内层受压应力，图 10.3-52a 所示的裂纹就是附加拉应力作用的结果。当坯料被挤出一段长度而成为外端金属后，则更增大了附加拉应力的数值。

如果凹模孔口形状复杂，例如挤压叶片时，由于厚度不均，各处的阻力也不一样，较薄处摩擦阻力大，冷却也较快，故流动较慢，受附加拉应力作用，常易在此处产生裂纹(图 10.3-52b)，尤其挤压低塑性材料更是如此。

挤压空心件时，如果孔口部分冲头和凹模间的间隙不均匀，间隙小处，由于摩擦阻力相对较大，金属温度降低也较大，金属流动较慢，受附加拉应力作用，可能产生如图 10.3-52c 所示的横向裂纹。流动快的部分由于受流动慢的部分的限制，受附加压应力。但是其端部却是受切向拉应力的作用，因此常常产生纵向裂纹，如图 10.3-52d 所示。

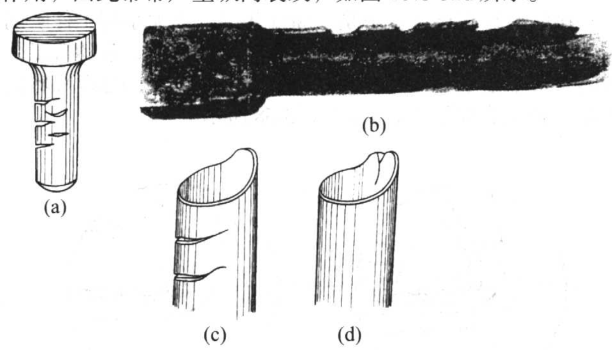


图 10.3-52　挤压时的裂纹

挤压过程中，当附加拉应力足够大时将引起挤压件截面尺寸减小，当挤出部分受力不对称时，将引起挤压件弯曲。

挤压过程结束后，附加应力遗留在挤压件内，便成为残余应力。

凹模孔口部分的表面状态（如粗糙度）是否一致，润滑是否均匀，圆角是否相等，凹模工作带长度是否一致等，对金属的变形流动也都有很大影响。

总之，孔口部分的变形流动情况对挤压件的质量有着直接影响。

因此，要解决挤压件的质量问题，一方面使筒内变形尽可能均匀，另一方面还应重视孔口部分的变形均匀问题，可以从下列几方面采取相应措施：

1) 减小摩擦阻力。如改善模具表面粗糙度，采用良好的润滑剂和采用包套挤压等。例如，冷挤压钢材时，需将坯料进行磷化和皂化。磷化的目的是在坯料表面形成多孔性组织，以便较好地储存润滑剂。皂化的作用是润滑。又如热挤压合金钢和钛合金时，除了在坯料表面涂润滑剂外，在坯料和凹模孔口间加玻璃润滑垫（图 10.3-53)。热挤铝合金型材时，为防止产生粗晶环等，常在坯料外面包一层纯铝。

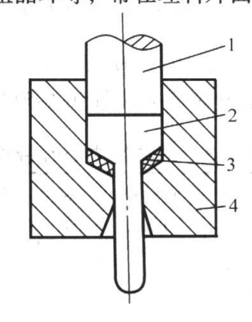


图 10.3-53　带润滑垫的挤压

1—冲头；2—坯料；3—润滑垫；4—凹模

2) 在锻件图允许的范围内，在孔口处作出适当的锥角或圆角。

3) 加反向力的方法进行挤压，见图 10.3-54。这有助于减小内、外层变形金属的流速差和附加应力，挤压低塑性材料时宜采用。

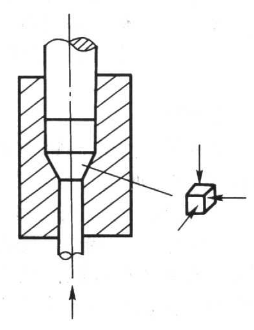


图 10.3-54　带反向推力的挤压

4) 采用高速挤压，因为高速变形时摩擦系数小一些。

对形状复杂的挤压件可以综合采取一些措施，在难流动的部分设法减小阻力，而在易流动的部分设法增加阻力，以使变形尽可能均匀，常用的措施是：

1) 在凹模孔口处采用不同的锥角。

2) 凹模孔口部分的定径带采用不同的长度（图 10.3-55)。

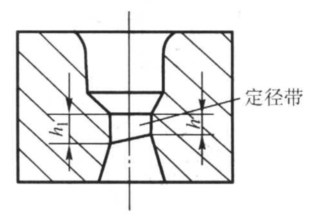


图 10.3-55　具有不同定径带长度的挤压凹模

3) 设置一个过渡区，使金属通过凹模孔口时变形尽可能均匀些（图 10.3-56)。

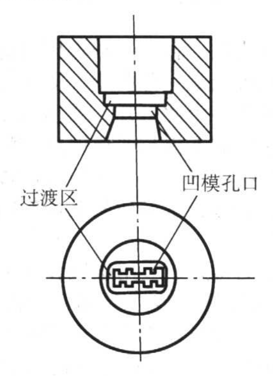


图 10.3-56　具有过渡区的挤压凹模

近年来我国开始采用冷静液挤压和热静液挤压技术。静液挤压是挤压杆压于液体介质中，使介质产生超高压（可达 2000～3 500MPa 或更高些)，由于液体的传力特点使毛坯顶端的单位压力与周围的侧压力相等。

由于毛坯与挤压筒之间无摩擦力，变形较均匀，另外由于挤压过程中液体不断地从凹模和毛坯之间被挤出，即液体以薄层状态存在于凹模和毛坯之间，形成了强制润滑，因而凹模与毛坯间摩擦很小，变形便较均匀，产品质量较好。由于变形均匀，附加拉应力小，因而可以挤压一些低塑性材料。

铝合金和一些镁合金的挤压件常常有粗晶环缺陷，其产生的原因和防止措施见文献［18］。

7　摆动辗压过程中的常见缺陷与控制措施

摆动辗压（简称摆辗）技术是20世纪60年代才出现的一种新的压力加工方法，它具有很多优点，因此受到世界各国重视，特别是近十几年来，得到了迅速发展和广泛的应用。

（1）摆动辗压工作原理

所谓摆动辗压，是利用一个带圆锥形的上模对毛坯局部加压，并绕中心连续滚动的加工方法。如图10.3-57所示，带锥形的上模中心线 oz 与机器主轴中心线 OM 相交成 γ 角，此角称摆角。当主轴旋转时，oz 绕 OM 旋转，于是上模便产生了摆动。与此同时，滑块3在液压油缸作用下上升，并对毛坯施压，这样上模母线就在毛坯上连续不断地滚动，最后达到整体成形的目的。

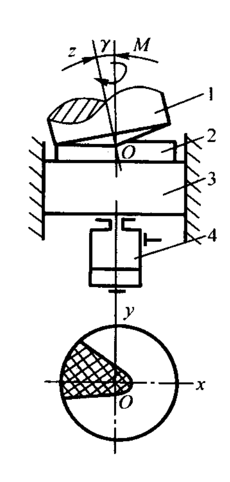


图10.3-57　摆动辗压工作原理示意图

1—摆头（上模）；2—毛坯；
3—滑块；4—进给液压缸

若圆锥上模母线是一直线，则辗压出的工件上表面为一平面，若圆锥上模母线是一种曲线，则工件上表面为一形状复杂的旋转曲面锻件。由此可知：摆动辗压属于连续局部加载成形方法。摆辗中的下模与普通锻造方法的下模形状基本相同，为使上模形状尽量简单，一般将锻件形状复杂的一面放在下模内成形，如辗压带齿形的锥齿轮时，都把带齿形部分放在下模内成形。

（2）摆动辗压的特点、应用领域和分类

1）省力。因摆辗是以连续局部变形代替常规锻造工艺的一次整体变形，因此可以大大降低变形力。实践证明，加工相同锻件，其辗压力仅是常规锻造方法变形力的1/5～1/20；

2）产品质量高，节省原材料，可实现少无切削加工　如果模具制造尺寸精度很高，且进行过抛光，则辗压件垂直尺寸精度可达0.025 mm，表面粗糙度可达 $R_a0.4\sim0.8$。

3）摆动辗压适合加工薄而形状复杂的饼盘类锻件　加工薄饼类锻件，摆辗所需的变形力比常规锻造力小很多，而且工件愈薄，用摆辗法成形愈省力。

4）劳动环境好，劳动强度低　摆辗时机器无噪声、震动小，易于实现机械化、自动化。

5）设备投资少，制造周期短，见效快，占地面积小。

摆动辗压在锻压行业中的应用越来越广泛，主要用来成形各种饼盘类、环类及带法兰的长轴类锻件，如法兰盘、齿轮坯、铣刀坯、碟形弹簧坯、汽车后半轴、扬声器导磁体、带齿形的伞齿轮、端面齿轮、链轮、销轴等。摆辗还可用于圆管缩口和管件翻边等。摆辗依据辗压温度不同分热辗、温辗、冷辗三种。

（3）影响摆辗件质量的主要工艺参数

1）工件与模具之间的面积接触率 λ（简称接触率 λ）。接触率是摆辗工艺中的一个极其重要的工艺参数，摆辗过程中的许多问题都与它有着密切的关系。它是指摆头与工件的接触面积与总的变形面积的比值。接触率 λ 可按式（10.3-1）确定

$$\lambda=0.45\sqrt{\frac{S}{2R\tan\gamma}} \tag{10.3-1}$$

式中，S 为每转进给量，mm/r；R 为工件变形半径，mm；γ 为摆头倾角，(°)。

接触率在摆辗过程中是不断变化的，其大小与工件瞬间的变形半径和每转进给量以及摆头的倾角有关，它随着工件瞬间变形半径 R 和摆头倾角 γ 的增大而减小，随着每转进给量 S 的增大而增大，如图10.3-58所示。

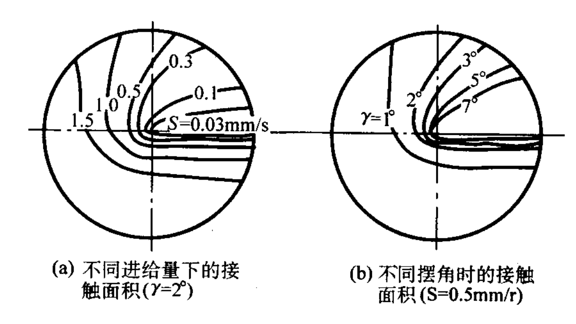


图10.3-58　不同进给量下和不同摆角时的接触面积（$R=15$ mm）

2）摆辗力。摆辗力是选取摆辗设备的主要参数之一，摆辗力的常用计算公式如下：

$$P=k\lambda\pi R^2\sigma_s \tag{10.3-2}$$

式中，λ 为接触面积率；R 为工件最大半径，mm；k 为模具限制系数，一般在1.5～2.0之间；σ_s 为材料的屈服极限，MPa。

该式表明摆辗力与接触面积率 λ 成正比。

3）摆头倾角 γ。摆头倾角 γ 是指锥形摆头轴心线与机器主轴中心线的夹角。摆头倾角的大小不仅直接影响着生产效率，也影响着设备的吨位和产品的质量等。

4）每转进给量 S。每转进给量为摆头旋转一周坯料在机器主轴方向上的送进量。若每转进给量过大，则接触面积增加，要求设备的吨位也随之增大，同时电机的功率也相应增加。

摆辗中常见缺陷产生的原因和控制措施如下。

（1）薄件中心开裂

薄件摆辗时，常易发生中心部分被拉裂现象，见表10.3-2；摆辗件中心开裂情况如图10.3-59所示。

表10.3-2　摆辗件中心开裂情况

序号	原始高度 H_0/mm	原始直径 D_0/mm	变形后高度 H/mm	相对变形程度 ε/%	开裂情况
1	20	20.2	2	90	中间出现凹坑
2	19.9	19.6	1.8	90.96	中间出现凹坑



续表 10.3-2

序号	原始高度 H_0/mm	原如直径 D_0/mm	变形后高度 H/mm	相对变形程度 ε/%	开裂情况
3	20	20	1.6	92	微裂
4	19	19.6	1.4	92.63	拉裂
5	19.2	20	1.4	92.33	拉裂

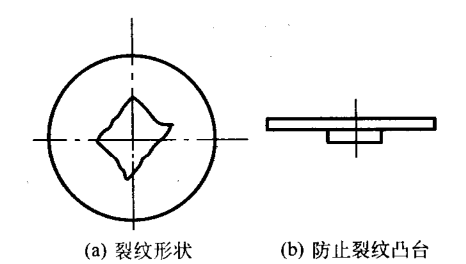

(a) 裂纹形状　　(b) 防止裂纹凸台

图 10.3-59 摆辗件中心开裂情况

由于摆动辗压是局部加载的回转加工工艺，因此无论是圆柱件或者是环形件，在摆辗过程中的接触面积只有一部分，因此可以把摆辗工件的加工表面分为接触区［A］与非接触区［B］，如图 10.3-60 所示。［A］区直接承受模具的压力而发生塑性变形成为主动变形区，［B］区虽然不直接承受模具的压力，但由于［A］区形变的影响也发生不同程度的形变成为被动变形区。在主动变形区内，金属在发生径向流动的同时还发生切向流动。如果将工件上表面刻上正交网格，经辗压后，网格线变成了 S 形，如图 10.3-61 所示。

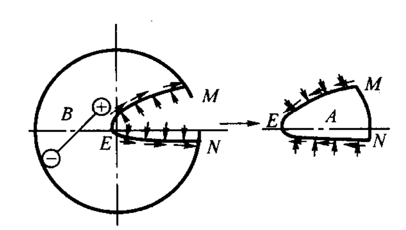


图 10.3-60 摆辗变形的分区及各区的受力与变形分析

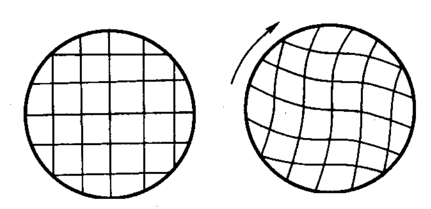


图 10.3-61 工件加工表面的网格畸变

接触区 A 的变形类似于镦粗，在高度方向被压缩，而径向和切向尺寸增加。但实际上又不同于镦粗，因为其边界中只有圆弧 MN 段为自由表面，因此主要伸长方向为径向，又由于在弧 MEN 周边的不完全刚性约束，所以 A 区的金属沿切向也有所伸长，表现为压缩变形。对于 B 区，可以将其看成是一个有 MEN 缺口的圆盘，在缺口处受压应力（表面上有附加的切应力存在），A 区对面部分接近中心处受拉应力，接近外表处受压应力。所以在接触区侧压力的作用下，非接触区的变形有三种：①小弹性变形；②大弹性变形，发生弹性失稳，以致于翘曲和起皱；③在接触区的对面产生塑性变形，形成所谓塑性铰。塑性铰的外侧变厚，内侧变薄。当工件较薄，摆角较大，每转进给量愈小时，由式(10.3-1) 及图 10.3-58 可知，此时接触率 λ 越小，即接触区越小。为分析方便，将接触区 A 简化成一扇形，当摆头上模压到工件时，如不发生摆辗滚动，变形的 A 区对对面的 B 区作用力如图 10.3-62 所示。由于 F_y、F_{Ty} 的作用，B 区要发生拉弯变形，工件心部产生拉应力，但由于摆辗径向变形量小，接触面上的切应力 τ 值不大，如不考虑 F_{Ty} 的影响，那么当 $\alpha = 180°$时，接触面积率 $\lambda = 0.5$、$F_y = 0$，中心不产生拉应力，对摆辗工艺而言，为了充分利用其省力特点，往往接触面积率 $\lambda \leqslant 0.25$，于是心部出现拉应力就不可避免。实验及计算表明，中心拉应力区域大小在 $0.4r_0$ 范围以内。

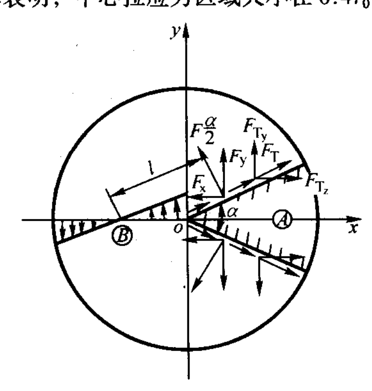


图 10.3-62 摆辗件中心受拉应力分析

为了防止薄件中心开裂，可采用工件中间局部加厚的办法，以增大断面系数，然后加工去掉加厚的部分。对于辗压铣刀片，盘形弹簧片，可增大进给量，使接触面积率 λ 增大，进而减少拉应力的产生，防止中心裂纹的出现。某单位在应用 1 000 kN 摆辗机热辗工件直径为 ϕ200 mm 的薄片时，每转压下量为 1～2 mm，由于压下量过小，产生了"中心拉裂"，后经改进，压下量 S 提高到每转为 4～7 mm，用棒料直接辗压的时间缩短到 2 s，工件成形良好。

当热摆辗薄盘件时，更应注意摆辗力 P 和每转压下量 S。这主要是因为满足两个条件方能保证产品质量。其一是初辗时每转要有较大的压下量，足够大的接触面积率，这样有利于锻件的压透，避免或减少变形的不均匀；其二是使辗压时间缩短，变形抗力降低，接触面积率较大，以避免"中心拉裂"，这就要求热辗时每转始终保持尽可能大的压下量 S。

初辗压下量一般为终辗压下量的 5～10 倍为宜。辗压碟形弹簧坯（材料为 60Si2MnA、50CrVA、65Mn），坯料的高径比 H/D 取为 1.3～1.7 时，不均匀变形不严重。辗压成 4～6 mm 厚，产品质量良好，不发生中心拉薄或中心拉裂等缺陷。

(2) 工件成蘑菇状、滑轮状或失稳折叠

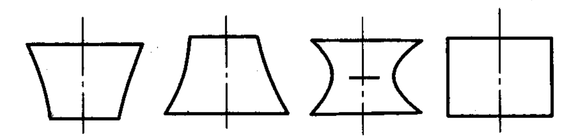
当工件较厚，每转进给量较小时，因上下模和工件接触面积不同，上边小下边大。由压力分布测试结果得知：靠近上模工件上的轴向单位压力较大，下模处较小，故邻近上模处的金属易满足塑性条件先变形流动，故易形成"正蘑菇头形"，如图 10.3-63a 所示。

如果进给量较大，则接触面积也较大，模具与工件之间摩擦力严重影响着金属的流动，在上模接触区开始发生塑性变形时，工件便立即贴合在上模上，成为模具的沿伸部分，使得下模接触区发生塑性变形，结果工件便成为倒蘑菇形，如图 10.3-63b 所示。当工件的相对厚度稍小一些，上模压在工件上以后，工件产生了轴向断面弯曲，使得下模接触面积变小，工件与上下模的接触区域同时满足屈服条件，产生径向和切向流动，此时塑性变形区在工件的上、下端，中部不变形或变形很小，结果工件变形后成滑轮状，如图 10.3-63c 所示，继续变形就要产生折叠。

若摆辗法兰长杆件（如摆辗汽车半轴，勾舌销件），由于露出端过长，摆辗时往往要产生失稳，使工件弯曲、折叠，进而报废。产生这种缺陷的原因是：摆辗变形时，由于工件受偏心载荷作用，比通常镦粗时允许的高径比小，易发

生纵向弯曲。

根据不同的变形条件，圆柱件摆辗变形情况如图 10.3-63 和表 10.3-3 所示。



(a) 正蘑菇头形 (b) 倒蘑菇形 (c) 滑轮形状 (d) 均匀变形

图 10.3-63 圆柱件摆辗变形情况

表 10.3-3 摆辗件变形情况

序号	工件变形后名称	变形条件
a	正蘑菇头形	$H_0/D_0>0.5$，γ 一定，s 较小，ε 一定，工件上端摩擦系数较小，易形成上大下小的正蘑菇头形状
b	倒蘑菇头形	$H_0/D_0>0.5$，γ 一定，s 较大，ε 一定，工件上端摩擦系数较大，且与工件粘结，工件下端面发生变形，易形成倒蘑菇头形状
c	滑轮形状	$H_0/D_0>0.5$，γ 一定，s 稍大，ε 较大，两端面同时发生变形，工件呈滑轮形状，继续变形产生折叠
d	均匀变形	$H_0/D_0\leqslant0.5$，γ、s 及 ε 一定，工件侧壁呈直线，工件形状平直

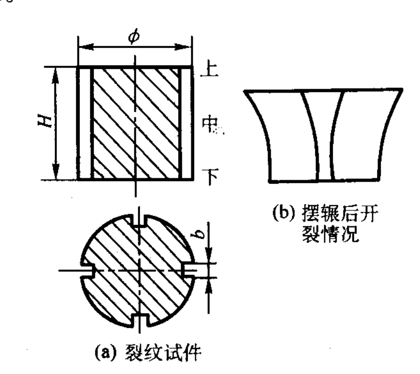
注：H_0、D_0 为工件原始高度及直径；s 为每转进给量；γ 为摆角；ε 为相对变形程度。

在实际生产中，可利用“蘑菇效应”的两重性，来加速头部成形，杆部可采用夹紧或选用合适模具间隙办法，限制纵向弯曲来生产合格锻件。我国生产汽车半轴时，杆部均用夹紧机械，以缩短自由端的长度；而生产勾舌销法兰长杆件，则是用限制插入下模中的杆与模壁间隙的办法，防止辗压头部时杆部的弯曲；取单面间隙为 0.2 mm 时，摆辗头部成形良好，而杆部不发生弯曲。

为了提高生产率和防止折叠的产生，应尽量加大每转进给量 s，以增大面积接触率 λ。

(3) 侧面开裂

摆辗变形时，如果试件（或工件）侧表面存在裂纹，在相同的条件下，摆辗变形易使裂纹向增大的方向发展（图 10.3-64）。有人在不同设备上用铝试件作了大量试验结果见表 10.3-4。



(a) 裂纹试件 (b) 摆辗后开裂情况

图 10.3-64 纵向裂纹试件

表 10.3-4 不同设备上镦粗和摆辗时纵向裂纹的发展情况

试件号	直径/mm				高度/mm			裂纹宽/mm								
	变形前	变形后			变形前	变形后	变形程度（%）	变形前			变形后			差值		
	ϕ	$\phi_上$	$\phi_中$	$\phi_下$	H	h	ε	$b_上$	$b_中$	$b_下$	$b'_上$	$b'_中$	$b'_下$	$\Delta b_上$	$\Delta b_中$	$\Delta b_下$
1	37.8	44.8	46.2	42.3	41.6	29.9	28.16	3.5	3.5	6.5	3.3	8.4	2.8	-0.2	4.9	-0.7
2	38	43	46.2	43.3	41.8	29.9	28.47	3.4	3.4	3.4	2.5	7.6	2.6	-0.9	4.2	-0.8
3	38	51.1	42.3	42.3	41.6	30.7	26.2	3.5	3.5	3.5	8.4	6.6	4	4.9	0.1	0.5

注：1 号件用 150 kg 空气锤镦粗；2 号件用 600 kN 材力实验机镦粗；3 号件用 300 kN 摆辗机摆辗。

由该表可见，摆辗变形时纵向裂纹有较大的扩展趋势，这是由于摆动辗压中，局部加载非轴对称不均匀变形所造成的，由图 10.3-60 所描述的摆辗变形各区的受力与变形分析可知，接触区的变形状态主要是径向伸长，由于局部加载导致非变形区对变形区的径向伸长起着一个限制作用，从而使得接触区的侧表面受到切向拉应力的作用。该切向拉应力有可能导致工件（或试件）侧表面产生裂纹或原有的裂纹扩大。某单位在生产铁路车辆的勾舌销件过程中发现，如果冷拔坯料表面上有微裂纹或因放件不慎被磕碰，则摆辗成形头部时很易造成开裂。为了防止摆辗时工件纵向开裂，必须选好原材料，注意拉拔质量，同时注意轻拿轻放，保护好外表面。

(4) 锻不透

由理论分析可知，摆辗变形具有表面性质，摆辗变形首先在头部发生。当摆头与工件接触弧长 $\alpha<H$ 时，会发生锻不透的现象。表 10.3-5 是用聚碳酸酯模拟件进行摆辗光塑性试验时的结果。

由表 10.3-5 可见，摆辗成形适合于薄件，只有当高径比小于 0.5，变形程度在 20%左右时，可使变形渗透到整个工件。

表 10.3-5 聚碳酸酯试件摆辗变形结果

No	D_0/mm	H_0/mm	H_0/D_0	压至高度 H_1/mm	卸载后高度 H_2/mm	塑性变形 ε_p/%	弹性变形 ε_0/%	变形深度	
								最大	最小
1	26.9	32.15	1.23	26.94	29.0	9.8	6.4		
2	26.75	23.92	0.89	20.84	22.3	6.8	6.1	16.39	10.80
3	26.999	14.96	0.55	11.18	11.18	21.2	4.1	全部变形	
4	29.90	24.28	0.90	19.82	21.7	10.6	4.7	15.59	11.19
5	26.99	25.00	0.56	12.38	13.1	12.7	4.8	10.08	

为了使变形深透，摆辗时在设备允许的条件下，应尽量加大进给量。如果采用恒功率泵，在热辗初期，进给量大，当温度降低，抗力增大时，进给量可自动减少，从而发挥摆辗省力的优点，又可减少镦弯，防止折叠的产生。

(5) 环形件断面畸形

环形工件摆辗时易造成工件断面畸形，如图10.3-65所示。环形件摆辗时外圆直径随变形程度的增加而增大，但工件的上、下端的外圆直径变化不一样。当变形程度较小时，上端外圆直径增加较快，如图10.3-65a所示。当变形程度为25%左右时，底部外圆直径增大加快，上、下变形均匀，如图10.3-65b所示。再增加变形程度时，工件底部外圆直径增加较快，下部外圆直径大，如图10.3-65c所示。

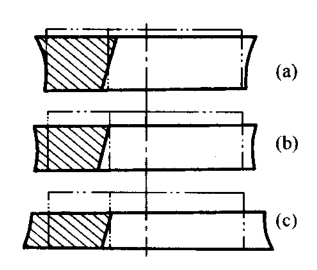


图10.3-65　环形工件的摆辗镦粗

内径变形与外径变形不同，当变形程度较小时，上端孔径比原毛坯内径略有缩小，下端孔径则增大，当变形程度较大时，上端孔径逐渐接近毛坯孔径，下端孔径进一步扩大。

(6) 圆角充不满

用摆辗法生产汽车半轴、齿轮坯、端面齿轮等锻件时，由于辗压时间过短或摆辗力过小，易造成工件圆角充不满。摆辗同锤上模锻一样，要得到有尖锐棱角的工件是很困难的，因此摆辗时固定模圆角在保证摆辗件加工余量的前提下，尽可能大，这样不但使摆辗成形容易，而且可以延长模具寿命。该缺陷可通过改善润滑条件和在模具上加工圆弧形槽来消除。

(7) 厚度不均匀

利用模具摆辗生产汽车半轴、齿轮坯等锻件时，还易产生厚度不均匀，这是摆头不正或摆辗进给量过大造成的。该缺陷可通过调整摆头位置或辗压终了时的精辗工艺加以解决。

8　楔横轧过程中的常见缺陷与控制措施

楔横轧中的主要质量问题是断裂、形成空腔和轧件表面螺旋压痕等。

断裂是由轴向拉应力过大引起的，即当满足下式的条件时，轧件将发生断裂。

$$2P_z \geqslant \frac{1}{4}\pi d_n^2 \sigma_b \qquad (10.3\text{-}3)$$

式中，P_z 为轧件轴向变形力，N；d_n 为轧件颈部直径，mm；σ_b 为材料的抗拉强度，MPa。

影响轴向力 P_z 的基本因素是成形角 α，如果略去展宽角 β 的影响，由图10.3-66可知，P_z 随 α 增加而增大。即

$$P_z = P_A \sin\alpha \qquad (10.3\text{-}4)$$

式中，P_A 为通过成形面作用给轧件的正压力。

轧件颈部直径 d_n 取决于轧制深度 Δr，通常以断面压缩率 R 表示。断面压缩率表达式为

$$R = \frac{\frac{1}{4}\pi d_0^2 - \frac{1}{4}\pi d_n^2}{\frac{1}{4}\pi d_0^2} = \left(1 - \frac{d_n^2}{d_0^2}\right) \times 100\% \qquad (10.3\text{-}5)$$

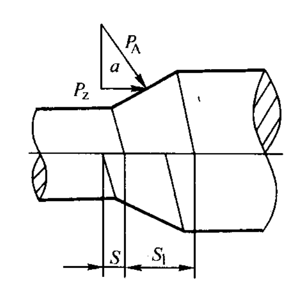


图10.3-66　轴向力同 α 角的关系

由上式可得

$$d_n = d_0\sqrt{1-R} \qquad (10.3\text{-}6)$$

式（10.3-6）表明，断面压缩率 R 增大，轴颈 d_n 减小，与此同时 $\Delta r = \frac{1}{2}(d_0 - d_n)$ 亦相应增大。Δr 增大意味着轧制接触面积及其轴向投影面积加大，从而 P_A 及 P_z 相应加大。这些因素均对轧件断裂有较大的影响。

轧件中心空腔主要是由变形区存在不均匀变形，在轧件断面中心引起的径向附加拉应力和剪切变形等造成的。空腔形成的机理在第1章第8节已有介绍。当附加拉应力达到材料的抗拉强度极限时，心部产生微裂纹，进而形成疏松和空腔。当接触面宽度 b 越窄，接触面长度 L 愈大时，愈易产生这种缺陷。

由几何关系得

$$L = S + S_1 = \pi r_k \tan\beta + \Delta r\cot\alpha \qquad (10.3\text{-}7)$$

该式表明，增大 β 和 Δr，减小 α 均使 L 增大；减小 α 值将使 S_1 增大，使 P_z 减小。二者均不利于金属的轴向流动，从而增大了横向的变形和加剧了空腔的产生。

因此，为防止空腔产生，断面收缩率不宜过大，β 宜取小值，α 宜取较大值。

轧件表面螺旋压痕是由 R 和 α 过大，导致 P_z 增大，使轧件发生附加的轴向伸长，使成形过程表面残留的螺旋压痕得不到精整所致。因此，为防止这种缺陷产生，R、α 不宜过大。

为防止上述缺陷产生，应合理控制工艺参数。楔横轧时工艺参数确定的原则，首先应确保轧制工艺过程的稳定，具体要求是：①应使轧件获得良好的旋转条件；②轧件不发生断裂现象；③轧件心部不产生疏松和空腔；④轧件外表面无明显的缩颈和螺旋压痕等缺陷。

为满足工艺稳定性的要求，R、β、α 取较小值，有利于满足旋转条件和避免发生缩颈和断裂。但从防止中心疏松考虑，希望 α 取较大值。为提高断面的压缩率、瞬时展宽量，减小轧辊直径和轧机结构尺寸，也希望 β 取较大值。因此，R、β 和 α 存在最佳的选用范围，分别介绍如下。

1) 断面压缩率 R。根据实验，$R \leqslant 65\%$ 为宜，最大不得超过75%。对于多次轧制，第一次压缩率 $R \leqslant 65\%$，第二次以及以后各道次的轧制 $R \leqslant 55\%$。对于带有厚度不大的翼缘，可采取堆轧扩径的办法，扩径率 R_d 可达8%左右。

2) 成形角 α。成形角 α 及由此决定的成形面对工艺稳定性有较大影响。当 $\alpha > 40°$ 时，轧件容易打滑，处于不稳定状态；$\alpha \leqslant 15°$ 时，由于金属轴向流动量减小，轧件有椭圆化的倾向，并且心部容易发生疏松等缺陷。因而。不宜过大或过小，一般取 $\alpha = 20° \sim 45°$，用得最多的是 $\alpha = 25° \sim 30°$。R 值大时，α 取较小值，反之 α 可取上限。

3) 展宽角 β。展宽角 β 决定楔的展开长度及轧件轴向变形速度。它对轧制力 P 和力矩 M 有显著影响，尤其是对轧件旋转条件影响最为显著。一般取 $\beta = 5° \sim 10°$，若 R 及 α

较大时，β应取较小值，反之取较大值。

根据R、α、β的最佳选用范围便可确定出楔横轧的最佳轧制区域，如图10.3-67所示。图中曲线R_f为轴向拉力过大而产生缩颈乃至断裂的界限；R_L为出现打滑的界限，R_m为轧件心部产生疏松乃至形成空腔的界限；R_b表示变形量小，由于材料流动产生表面缺陷的界限。以上诸曲线所包围的区域即为可能轧制成形的区域。图中$\frac{\sigma_x}{2K}$为随材质而变化的因素，即如果坯料材质好，$\frac{\sigma_x}{2K}$就大，轧制区域可适当扩大。图中点划线R_{op}为最佳断面压缩率。

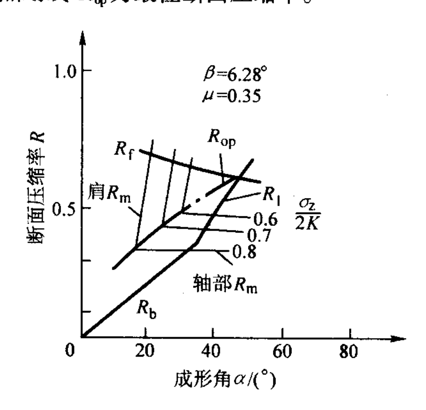


图10.3-67 轧制区域图

图10.3-68给出了α和β之间的制约关系，曲线V表示轧制时不致打滑的$\alpha-\beta$的上限，曲线L表示轧件不产生空腔的$\alpha-\beta$的下限。两曲线之间为α、β选择范围。虚线之间的范围是考虑材料加工性能、摩擦系数等因素的影响，对V、L曲线进行修整后所获得的界限。

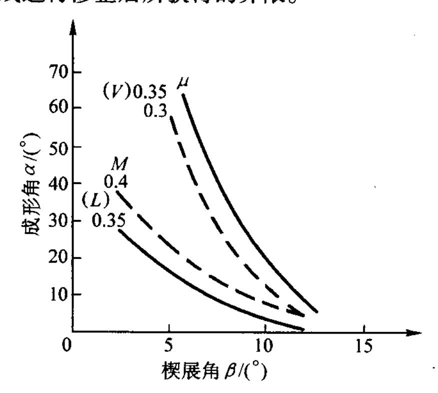


图10.3-68 参数$\alpha-\beta$选定图

9 冲压成形中的常见缺陷与控制措施

板料冲压成形中的主要缺陷有裂纹、起皱和弹复、翘曲等。本节介绍前两个问题。

9.1 裂纹

冲压成形中的裂纹有弯曲时工件外侧的拉裂、拉深时工件传力区的拉裂、胀形时的拉裂和曲面零件拉深时的拉裂等。

弯曲时，材料塑性低，凸模的弯曲半径过小或弯曲线与金属纤维方向垂直等常易引起工件外侧开裂。

拉深时，当轴向拉应力过大时，传力区可能产生塑性变形或在危险断面处被拉断。传力区的轴向拉应力p决定于拉深系数m_1、材料性能、模具几何参数、压边力和润滑条件等。拉深系数m_1愈小，压边力愈大，润滑条件愈差时，轴向拉应力也愈大。拉深过程中发生拉断的危险时刻是在拉深变形的最初阶段，即在最大拉深力出现之前或在最大拉深力出现时。因此，保证拉深过程顺利进行的条件是使传力区的最大轴向拉应力小于危险断面的抗拉强度，即$p_{max}<\sigma_p$。

胀形时坯料的塑性变形局限于一个固定的变形区范围内，材料不向变形区外转移，也不从外部进入变形区内（图10.3-69）。在胀形过程中，变形区的材料在平面方向扩张，厚度方向减薄，所以从本质上说，胀形是坯料在双向拉应力作用下的一种成形工艺，其应力应变状态如图10.3-70所示。

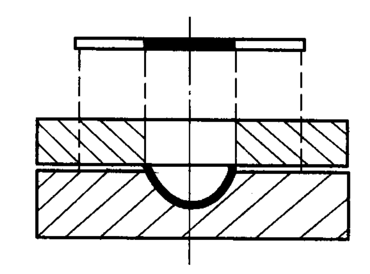


图10.3-69 胀形示意图

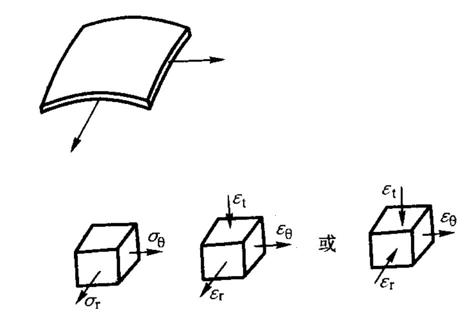


图10.3-70 胀形区应力应变状态

胀形时深径比（$\frac{h}{d}$）或深宽比（$\frac{h}{b}$）过大或胀形区过渡部分圆角太小时将引起破裂。对简单形状的件，例如在平板上局部胀出半球形或压筋等，材料在胀形中所能达到的极限伸长率可以概略地用下式来检查，即

$$\frac{L_1-L}{L}\times100\%\leqslant0.75\delta \qquad (10.3\text{-}8)$$

式中，L_1为胀形后变形区坯料沿截面的长度，mm；L为胀形前变形区坯料沿截面的长度，mm；δ为材料的伸长率，%。

对于复杂的非轴对称形状的胀形，它的成形极限已不能用一个简单的指标或公式加以概括，而需要采用成形极限图。

成形极限图是表示材料在双向拉应力下成形时不同应力的比值（$m=\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$）下所能达到的极限变形程度的曲线（图10.3-71）。这里σ_1是两个主应力中较大的一个。

由图可见，成形极限曲线的高低与加载路径有关。在实际生产中的胀形工艺一般可以认为是简单加载。在以真实应变为坐标的成形极限图上，简单加载路径表现为由原点出发的一条直线（图10.3-71）。

应用成形极限图可以判断胀形的成形极限，控制和改善胀形过程。

例如应用测量应用的网格技术，测出胀形零件危险点的应变值，并将其值标在成形极限图上，如图10.3-72所示，如果该值落在临界区内（位置A），说明极容易破裂，零件压制时废品率将很高；如果落在靠近临界曲线的地方（如位

置 B 或 D)，说明比较安全，但也有破裂的可能；如果落在远离临界曲线以下（位置 C)，说明安全裕度大，若有需要，还可以提高该处的变形程度。

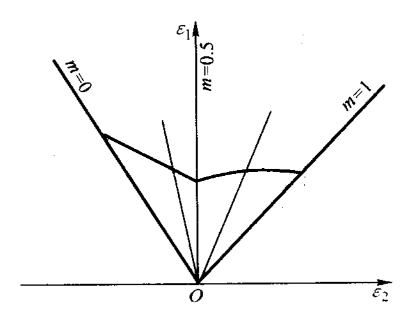


图 10.3-71　成形极限图与应力状态

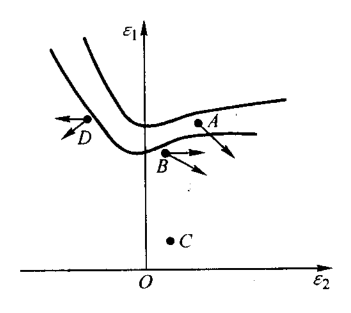


图 10.3-72　用成形极限图调整可控因素

应用成形极限图可以有目的地调整对胀形有影响的各种控制因素，使胀形过程合理化，生产中可供调整的因素有：模具圆角、坯料尺寸、润滑情况和压边力等。另外，可以通过控制加载路径和利用板材的性能方向性等来提高成形极限和冲压制品的成品率。

9.2　起皱

冲压成形时，为使坯料产生塑性变形，模具对板料施加外力，在板内产生复杂的应力状态。由于板厚尺寸与其他两个方向尺寸相比很小，因此厚度方向是不稳定的。当材料不能维持稳定的变形时就会产生失稳起皱。如前所述，当外力在板料平面内引起的压应力使板厚方向达到失稳极限时便产生失稳起皱，皱纹的走向与压应力垂直。

引起压应力的外力如图 10.3-73 所示，大致可分为压缩力、剪切力、不均匀拉伸力及板平面内弯曲力四种。因此失稳起皱也相应的有四种。

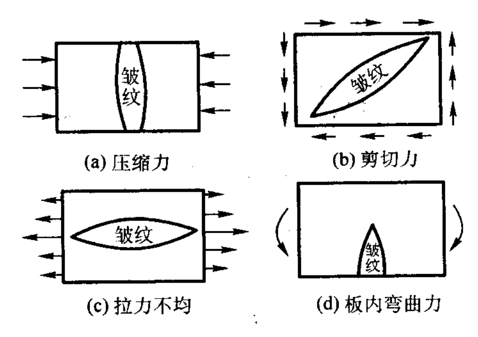


图 10.3-73　平板失稳皱纹的分类

(1) 压应力引起的失稳起皱

圆筒形零件拉深时法兰变形区的起皱，曲面零件成形时悬空部分的起皱，都属于这种类型。成形过程中变形区坯料在径向拉应力 $\sigma_1>0$，切向压应力 $\sigma_3<0$ 的平面应力状态下变形，当切向压应力达到失稳临界值时，坯料将产生失稳起皱。塑性失稳的临界应力可以用力平衡法和能量法求得。为了简化计算，多用能量法。

不用压边圈的拉深，如图 10.3-74 所示，拉深过程中法兰变形区失稳起皱时能量的变化主要有三部分。

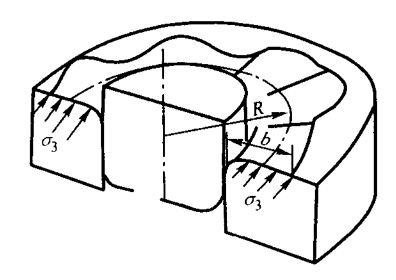


图 10.3-74　法兰变形区失稳起皱

1) 皱纹形成时，假定皱纹形状为正弦曲线，半波（一个皱纹）弯曲所需的弯曲功为

$$u_w=\frac{\pi E_r I\delta^2 N^3}{4R^3} \tag{10.3-8}$$

2) 法兰内边缘在凸模和凹模圆角间夹持得很紧，相当于内周边固持的环形板，起着阻止失稳起皱的作用，与有压边力的作用相似，可称为虚拟压边力。失稳起皱时形成一个皱纹，虚拟压边力所消耗的功为

$$u_x=\frac{\pi RbK\delta^2}{4N} \tag{10.3-9}$$

3) 变形区失稳起皱后，周长缩短，切向压应力 σ_3 由于周长缩短而放出能量。形成一个皱纹，切向压应力放出的能量为

$$u_f=\frac{\pi\delta^2 N}{4R}\sigma_3 bt \tag{10.3-10}$$

上述各式中，N 为皱纹数；R 为法兰变形区平均半径；b 为法兰变形区宽度；δ 为起皱后的皱纹高度；K 为常数。

法兰变形区失稳起皱的临界状态是切向压应力所释放的能量等于起皱所需的能量，即

$$u_f=u_w+u_x \tag{10.3-11}$$

将前边各能量值代入式（10.3-11）整理后得

$$\sigma_3 bt=\frac{E_0 IN^2}{R^2}+bk\frac{R^2}{N^2} \tag{10.3-12}$$

对皱纹数 N 进行微分，并令 $\frac{\partial\sigma_3}{\partial N}=0$，便得到临界状态下的皱纹数

$$N=1.65\frac{R}{b}\cdot\sqrt{\frac{E}{E_0}} \tag{10.3-13}$$

将 N 值代入式（10.3-12）得起皱时临界切向压应力 $\bar{\sigma}_{3k}$

$$\bar{\sigma}_{3k}=0.46E_0\left(\frac{t}{b}\right)^2 \tag{10.3-14}$$

因此可得到不需压边的极限条件

$$\sigma_3\leqslant 0.46E_0\left(\frac{t}{b}\right)^2 \tag{10.3-15}$$

由式（10.3-15）可以看出，压应力临界值与材料的折减弹性模量、相对厚度 $\frac{t}{b}$ 有关。材料的弹性模量 E、硬化模量 F 越大，相对厚度越大，切向压应力越小，不用压边的

可能性就越大。

生产中多数情况都是超过上述的极限条件，主要的解决措施就是施加压边力，但压边力大小应适当，不宜过大，否则会引起传力区开裂。

（2）剪切力引起的失稳起皱

剪应力引起失稳起皱，其实质仍然是压应力的作用。例如板坯在纯剪状态下在与剪应力成45°的两个剖面上分别作用着与剪应力等值的拉应力和压应力。只要有压应力存在就有导致失稳的可能。失稳时剪应力的临界值可写成

$$\tau_k = K_s E \left(\frac{t}{b}\right)^2 \qquad (10.3\text{-}16)$$

对于不同边界条件的矩形板，四边约束不同时，K_s 值也不同（见图 10.3-75）。

由式（10.3-16）可以看出，板料在纯剪切状态下失稳时剪应力的临界值与厚度的平方成正比，与其特征尺寸（宽度 b）的平方成反比。

在压缩翻边和伸长翻边过程中，材料向凹模口流入时，由于侧壁的干涉受到很强的剪切力的作用，因而容易产生失稳起皱，图 10.3-76a 是伸长类曲面翻边件侧壁在剪应力作用下形成的皱纹。图 10.3-76b 是汽车车体中立柱在剪切力作用下产生的皱纹。

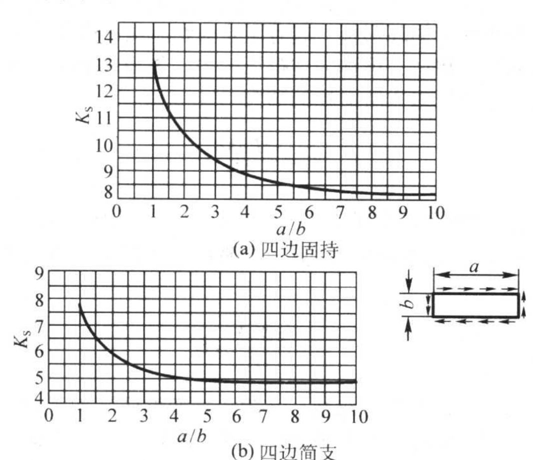


图 10.3-75　K_s 值随边界条件变化的曲线

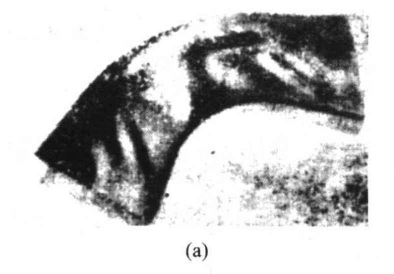
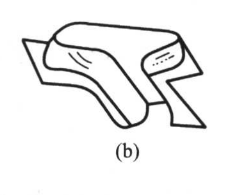


(a)　(b)

图 10.3-76　剪切力引起的皱纹

图 10.3-77 是平板在压应力和剪应力作用下失稳时极限应力值的比较，由该图可见，剪切时的失稳极限应力 τ_k 比压缩失稳时极限应力 σ_k 高。所以受压缩情况比受剪切的情况更容易失稳。

（3）不均匀拉应力引起的失稳起皱

当平板受不均匀拉应力作用时，在板坯内产生不均匀变形，并可能在与拉应力垂直的方向上产生附加压应力。该压应力是产生皱纹的力学原因。拉应力的不均匀程度越大，越易产生失稳起皱。皱纹产生在拉力最大的部位，其走向与拉伸方向相同。平板沿宽度方向上的不均匀拉应力 σ_1 的分布如图 10.3-78a 所示。由此引起的应力 σ_x 和 σ_y 在平板面内的分布，分别如图 10.3-78b、c 所示。由图 10.3-78c 可知，在平板中间部位 σ_y 为压应力，由它引起平板的失稳起皱。

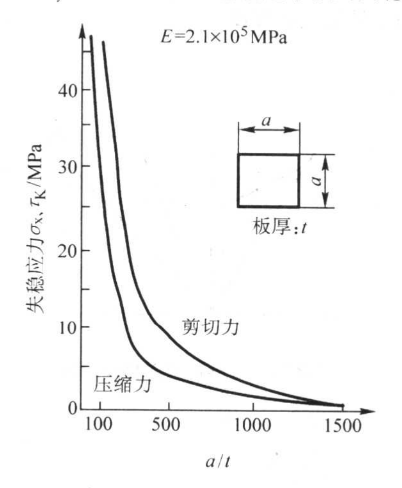


图 10.3-77　压缩力及剪切力引起失稳时临界应力比较

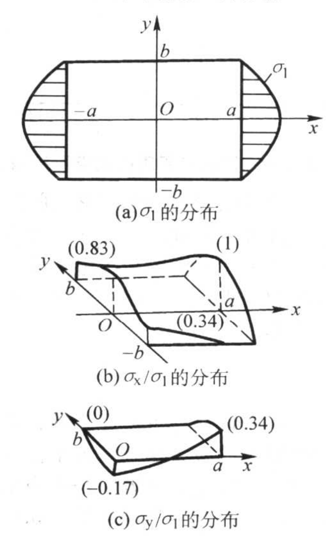


图 10.3-78　平板在不均匀拉力作用下的应力分布

在冲压成形时，凸模纵断面或横断面的形状比较复杂时，坯料的局部会承受不均匀拉力的作用。如图 10.3-79a 所示的棱锥台的拐角处的侧壁，由于材料流入的同时产生收缩，再加上由不均匀拉力引起的压应力的作用，就更容易产生失稳起皱。图 10.3-79b 所示的鞍形拉深件，底部产生的皱纹也是由于不均匀拉应力引起的。

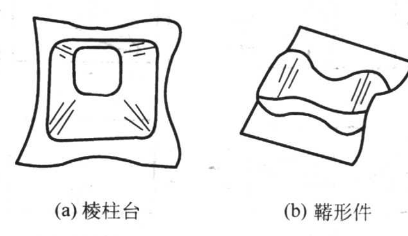

(a) 棱柱台　(b) 鞯形件

图 10.3-79　拉力不均匀形成的皱纹

关于板料内弯曲应力引起的失稳起皱，在冲压成形中较少产生，不太常见，故在此不作介绍。

编写：单德彬（哈尔滨工业大学）
杨玉英（哈尔滨工业大学）



第 4 章　大型锻件的常见缺陷与控制措施

大型锻件一般安装在机器设备的关键部位，承受复杂而繁重的工作负荷。有的还要在高温、高压、高速转动、腐蚀环境下工作，服役条件严酷，安全可靠性要求极高。因此对组织性能要求非常严格。然而由于制件重量和体积巨大，多用铸锭直接锻造，由于铸锭内部组织不均，缺陷较多，加上工艺流程冗长，影响因素众多，热力过程不连续，所以容易产生废次品，因而质量控制一直是生产中的关键性难题。其次，锻压成形属于非稳态、多因素、高温、高压的变形过程，研究方法有待完善。再者，大锻件锻后冷却与热处理也很复杂，这些都给质量控制提出了许多难题。为了提高大锻件的使用性能，防止对工作母机和重大装备造成不良影响。在目前主要还是强化质量检查及时检出废次品。随着科技进步和生产发展，已经认识到加强质量控制的积极作用，因为合理的质量控制对生产过程的顺利进行，确保产品的质量，减少经济损失有重要意义。

大型锻件的质量主要体现在：原材料有优越的冶金品质；锻件具有均匀致密的组织结构；良好的力学性能；合格的形状尺寸等。要保证大锻件使用性能最好，缺陷最少，首先要提高钢液的纯净度，比如重要锻件用钢广泛采用炉外精炼，真空除气，有效去除钢中非金属夹杂、有害元素和气体杂质。同时要注意清洁浇铸，保持钢质纯洁度。在铸锭方面选择合理的锭型，控制凝固结晶条件获得理想的组织结构。实践证明：优质的钢锭是生产优质大锻件的基础。其次，要合理加热，不仅要均匀热透提高塑性，便于锻压成形，而且要防止加热裂纹、过烧、过热、粗晶和欠热及温度不均匀等缺陷。在锻造时不仅要达到规定的形状和尺寸精度，更重要的是要打碎铸态组织，压实疏松结构，均匀变形分布，不产生锻造裂纹等缺陷。并且还要得到合理的流线分布和良好的锻造组织。在锻后冷却和热处理方面要能够改善组织，细匀化晶粒，消除应力，防止白点，提供良好的组织性能。一般而论，先进合理的锻压及热处理工艺是提高效益，制造优质大锻件的重要保证。

大锻件制造是消耗大、高投入、技术和劳动密集型的产业。如何提高大锻件的合格率，防止缺陷与废品，一直是生产中重要的研究课题。随着科学技术的进步，除了能够及时检出废次品，分析缺陷原因，采取对策加以防范外。在生产过程的各个环节开展质量控制，消除缺陷，促进生产科学化、合理化，在技术上经济上更具有重要的意义。

1　大型锻件的常见缺陷及其防治措施

大型锻件中的缺陷分类如下。

从缺陷性质上分为：化学成分、组织性能不合格，第二相析出，类孔隙性缺陷和裂纹五大类。

从缺陷的产生方面可分为：在冶炼、出钢、注锭、脱模冷却或热送过程中产生的原材料缺陷。在加热、锻压、锻后冷却和热处理过程中产生的锻件缺陷两大类。

大型锻件中，由于锻件截面尺寸大，加热、冷却时温度分布的不均匀性大，锻压变形时，金属塑性流动差别大，加上大钢锭冶金缺陷多，因而容易形成一些不同于中小型锻造的缺陷。如严重偏析和疏松，密集性夹杂物，发达的柱状晶及粗大不均匀晶粒，开裂与白点敏感倾向，粗晶遗传性与回火脆性，组织性能严重不均匀，形状尺寸超差等等。

大型锻件中常见的主要缺陷有：

(1) 偏析

钢中化学成分与杂质分布的不均匀现象，称为偏析。

一般将高于平均成分者，称为正偏析，低于平均成分者，称为负偏析。尚有宏观偏析（如区域偏析）与微观偏析（如枝晶偏析，晶间偏析）之分。

大锻件中的偏析与钢锭偏析密切相关，而钢锭偏析程度又与钢种、锭型、冶炼质量及浇注条件等有关。合金元素、杂质含量、钢中气体多都会加剧偏析的发展。钢锭愈大，浇注温度愈高，浇注速度愈快，偏析程度愈严重。

1）区域偏析。区域偏析属于宏观偏析，它是由钢液在凝固过程中选择结晶，溶解度变化和密度差异引起的。如钢中气体在上浮过程中带动杂质富集的钢液上升形成的条状轨迹，称为须状偏析或称∧形偏析、沟槽偏析。铸锭顶部先结晶的晶体和高熔点的杂质下沉，仿佛结晶雨下落形成的轴心V形偏析。沉淀于锭底形成负偏析沉积锥。铸锭上部区域最后凝固，碳、硫、磷等偏析元素富集，形成缺陷较多的正偏析区。偏析带由小孔隙及富集元素构成，对锻件组织性能有不良的影响。

图 10.4-1 为我国解剖的 55t34CrMo1A 钢锭纵剖面硫印低倍照片及区域偏析示意图。

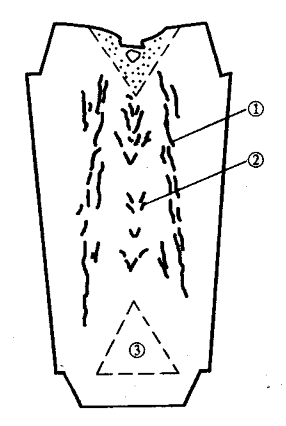


图 10.4-1　钢锭区域偏析硫印示意图
①∧形偏析带；
②V形偏析带；
③负偏析区

防止区域偏析的措施是：

① 降低钢中硫、磷等偏析元素和气体的含量，如采用炉外精炼，真空碳脱氧（VCD）处理及钢包吹氩工艺。

② 采用多炉合浇、冒口补浇、振动浇注及发热冒口，绝热冒口等技术。

③ 合理控制注温与注速，采用短粗锭型，改善结晶条件防止偏析产生。

在锻件横向低倍试片上，呈现与锭型轮廓相对应的框形特征，称为框形偏析。图 10.4-2 是 30CrMnSiNiA 钢制造的大型模锻件低倍试片上显示的框型偏析，它是锭型偏析在变形后，沿分模面扩展而呈现为框形。



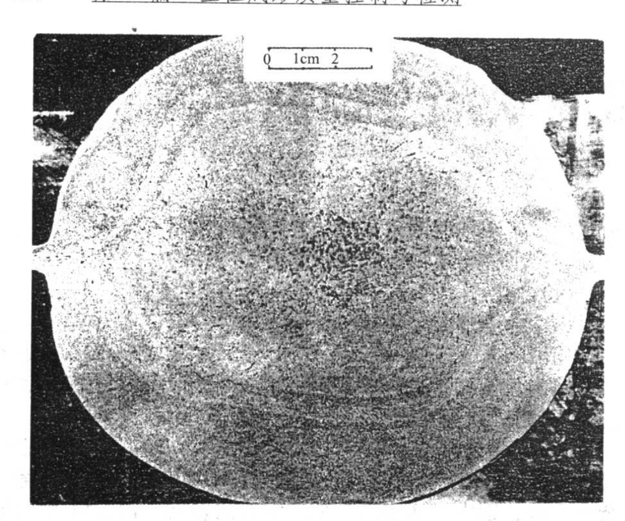


图 10.4-2　30CrMnSiNiA 钢模锻件横向低倍试片上显示的区域偏析 1:1 盐酸水溶液热蚀

电渣重熔以其纯净度高、结晶结构合理，成为生产大锻件原材料的重要方法，但是如果在重熔过程中电流、电压不稳定，可能形成波纹状偏析。当电流、电压增高时，钢液过热，结晶速度减缓，钢液中的溶质元素在结晶前沿偏聚形成富集带；当电流、电压减小时，熔质元素偏聚程度减小，这种周期性的变化，便形成了波纹状的偏析条带。

在横向低倍酸浸试片上呈分散的深色斑点状区域偏析，称之为点状偏析。图 10.4-3 为分布于整个锻件横向截面上的点状偏析。

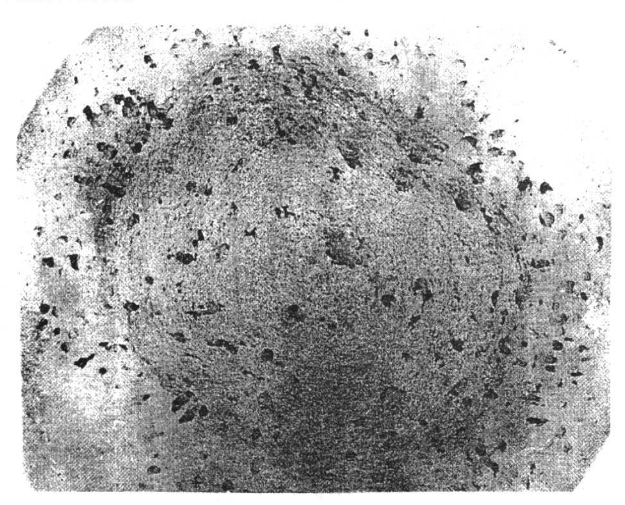


图 10.4-3　45 钢锻件横向低倍试片上的点状偏析 1:1 盐酸水溶液热蚀

2）枝晶偏析。树枝状结晶与晶间微区成分的不均匀性，可能引起组织性能的不均匀分布。采用扫描电镜（SEM）、波谱仪（WDS）、能谱仪（EDS）进行微区观察和成分分析可以检出，因而它属于微观偏析。微观偏析一般通过高温扩散加热，合理锻压变形与均匀化热处理可以消除或减轻其不良影响。

（2）夹杂物与有害微量元素

夹杂物按其来源可分为内生夹杂与外来夹杂两种。

常见的内生夹杂物主要有硫化物、硅酸盐、氧化物等。它们在钢中的数量和组成与钢的成分、冶炼质量、浇注过程以及脱氧方法有关。熔点高的内生夹杂，凝固先于基体金属，结晶不受阻碍，呈现为有规则的棱角外形；熔点较低的内生夹杂，由于受已凝固金属的限制，形态多为球状、条状、枝晶状并沿晶界分布。硫化物与塑性较好的硅酸盐组元，当钢锭经锻压变形时，沿主变形方向延伸，呈条带状。图 10.4-4 示出 34CrNi3Mo 转子钢中拉长的 MnS 夹杂形状。而氧化物及塑性较差的硅酸盐夹杂，在锻压变形时被破碎成小颗粒，呈链球状分布。图 10.4-5 为沿变形方向分布的链状氧化物夹杂。尺寸细小，弥散分布的内生夹杂，多为微观缺陷，危害程度较小。而大片或密集云团状分布的夹杂构成宏观缺陷，对锻件使用性能有极坏的影响，容易引发严重的失效事故。

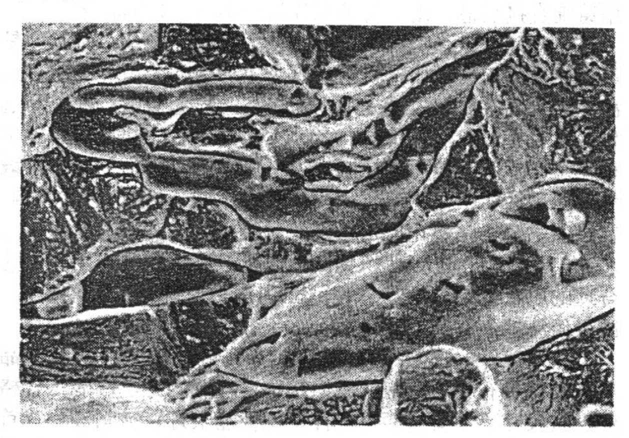


图 10.4-4　变形后的 MnS 夹杂形态 SEN　500×



图 10.4-5　被变形破碎的氧化物夹杂 LM（未浸蚀）　500×

外来夹杂系指混入钢中的炉渣、保护渣、氧化膜、耐火材料和异金属块等。通常外来夹杂较粗大，严重者将破坏钢的连续性而使锻件报废。

由于大锻件在机械装备中的作用和地位十分重要，所以对其质量要求更为严格，为此，对钢中铅、锑、锡、铋、砷等微量元素要加以控制，以提高锻件的强韧化水平。

降低钢中夹杂的一般措施是：

1）钢液真空处理，炉外精炼，净化钢液质量。

2）清洁浇注，防止外来夹杂污染与异金属进入。

3）合理锻造变形，改善夹杂分布。

（3）缩孔与疏松

这是一类孔隙性缺陷，破坏金属的连续性，形成应力集中与裂纹源，一旦形成裂纹，容易引发灾难事故。

钢锭开坯时切除量不够，残留缩孔及疏松，表现为锻件端头有管状孔穴或者严重的中心疏松。图 10.4-6 所示为 9Cr2Mo 钢制冷轧辊，因钢锭浇注温度偏低，冒口补缩不良，缩孔深入到锭身区，锻造时未能完全切除而形成缩孔残余。横向试片上中心部位呈现出枝叉状孔洞特征。进一步解剖，



末端存在疏松组织。

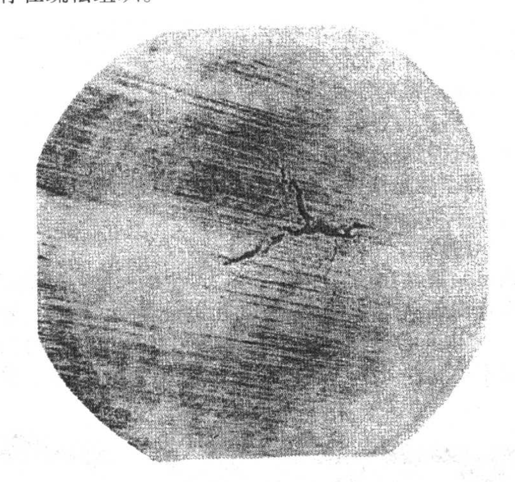


图 10.4-6　锻件中缩孔残余横向试片上的宏观形貌

防止该类缺陷的措施是：

1）严格控制浇注温度和速度，防止低温慢速注锭。

2）采用发热冒口或绝热冒口，改善补缩条件使缩孔上移至冒口区，防止缩孔深入到锭身处，锻造时加大钢锭冒口切头量，充分切净缩孔疏松。

3）高温扩散加热，合理锻压变形，压实焊合该类空隙性缺陷。

（4）气泡

气泡分内部气泡与皮下气泡两种。

钢中气体由炉料、炉气、空气进入，当冶炼时脱氧不良，沸腾排气不充分，则钢液中气体含量过多，凝固过程中，随温度降低，气体溶解度下降而由钢液中析出，形成内部气泡。当钢锭模壁潮湿、锈蚀、涂料中含有水分或挥发性物质，在注入高温钢水时产生气体向钢锭表层渗透，形成皮下气泡。

气泡经过锻压变形会压扁，未焊合的气泡还会扩展成裂纹。

防止气泡的措施是：

1）充分烘烤炉料与浇注系统。

2）冶炼时充分脱气，并采用保护浇注工艺。

3）高温加热、合理锻压焊合孔洞缺陷。

4）及时烧剥表面裂纹。

（5）锻造裂纹

在大型锻造中，当原材料质量不良或锻造工艺不当时往往会产生锻造裂纹。下面介绍几个由于材质不良引起锻裂的情况。

1）钢锭裂纹引起的锻造裂纹。大部分钢锭缺陷，锻造时都可能造成开裂，图 10.4-7 所示为 2Cr13 主轴锻件中心裂纹。这是因为该 6t 钢锭凝固时结晶温度范围窄，线收缩系数大。冷凝补缩不足，内外温差大，轴心拉应力大，沿枝晶开裂，形成钢锭轴心晶间裂纹。该裂纹在锻造时进一步扩展，在主轴锻件中心形成裂纹。该缺陷可通过下列措施予以消除：

① 提高冶炼钢水纯净度。

② 铸锭缓慢冷却，减少热应力。

③ 采用良好的发热剂与保温帽，增大补缩能力。

④ 采用中心压实锻造工艺。

2）钢中有害杂质引起的锻造裂纹。钢中的硫常以 FeS 形式沿晶界析出，其熔点仅有 982℃，在 1 200℃锻造温度下，晶界上 FeS 将发生熔化，并以液态薄膜形式包围晶粒，破坏晶粒间的结合而产生热脆，轻微锻击就会开裂。

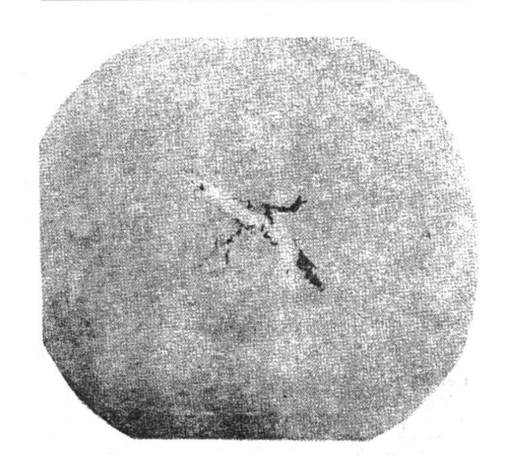


图 10.4-7　轴心晶间裂纹引起的锻造开裂

钢中含铜在 1 100 ~ 1 200℃温度下的氧化性气氛中加热时，由于选择性氧化，表层会形成富铜区，当超过铜在奥氏体中溶解度时，铜则以液态薄膜形式分布于晶界，形成铜脆，不能锻造成形。如果钢中存在有锡、锑还会严重降低铜在奥氏体中的溶解度，加剧这种脆化倾向。图 10.4-8 为 16Mn 钢锻件网状裂纹，因含铜量过高，锻造加热时，表面选择性氧化，使铜沿晶界富集，锻造裂纹沿晶界富铜相萌生并扩展而形成。

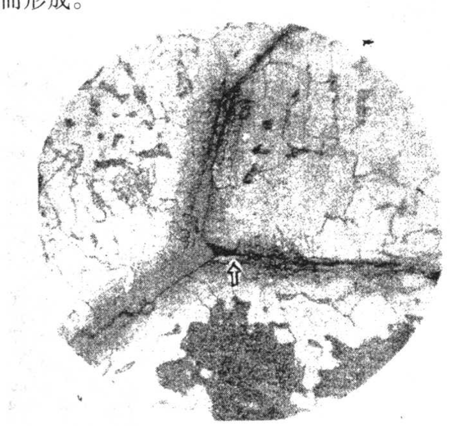


图 10.4-8　16Mn 钢锻造网状裂纹
LM4%稀硫酸水溶液浸蚀

3）异相（第二相）引起的锻造裂纹。钢中第二相的力学性能往往和金属基体有很大的差别，因而在变形流动时会引起附加应力导致整体工艺塑性下降，一旦局部应力超过异相与基体间结合力时，则发生分离，形成孔洞。例如，钢中的氧化物、氮化物、碳化物、硼化物、硫化物、硅酸盐等等。假如这些相呈密集、链状分布，尤其在沿晶界结合力薄弱处存在，高温锻压就会开裂。图 10.4-9 是 20SiMn 钢 87t 锭因细小的 AlN 沿晶界析出引起锻造开裂的宏观形貌，其表面已经氧化，呈现多面体柱状晶。微观分析表明，锻造开裂与 AlN 沿晶界大量析出有关。

防止因氮化铝沿晶析出引起锻造开裂的措施是：

① 限制钢中加铝量，去除钢中氮气或用加钛法抑制 AlN 析出量。

② 采用热送钢锭，过冷相变处理工艺。

③ 提高热送温度（>900℃）直接加热锻造。

④ 锻前进行充分的均匀化退火，使晶界析出相扩散。

（6）过热、过烧与温度不均

加热温度过高或高温停留时间过长容易引起过热、过烧。过热使材料的塑性与冲击韧度显著降低。过烧则材料的晶界剧烈氧化或者熔化，完全失去变形能力。

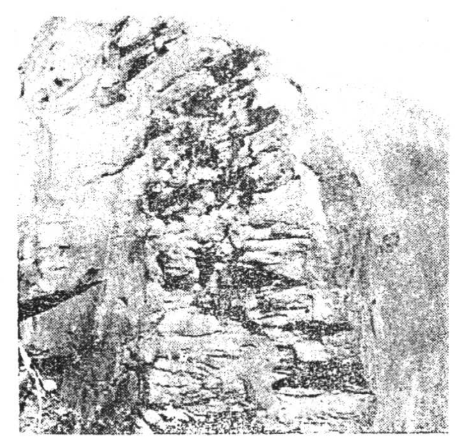


图 10.4-9 AlN 引起的锻造开裂

加热温度严重不均匀，表现为锻坯内外、正反面、沿长度温差过大，在锻造时会引起不匀变形，偏心锻造等缺陷。由于加热时没有均匀热透亦称欠热，也会造成不均匀变形，附加应力及锻造开裂等缺陷。

图 10.4-10 是 5 t PCrNi3Mo 钢锻坯过热组织，试样用 10%（体积分数）硝酸水溶液和 10%（体积分数）硫酸水溶液腐蚀，金相显微镜（LM）观察，可见晶粒粗大，晶界呈黑色，基体灰白色，显示为过热特征。

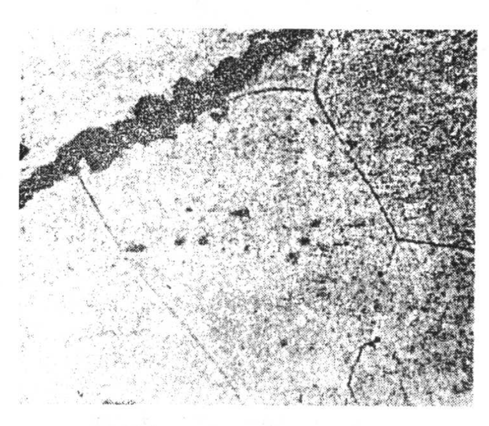


图 10.4-10 PCrNi3Mo 钢锻件过热组织 100×

图 10.4-11 所示为轴承钢 GCr15SiMn 锻件过烧引起的裂纹，晶界上有熔化痕迹及低熔点析出相，裂纹沿晶界扩展。

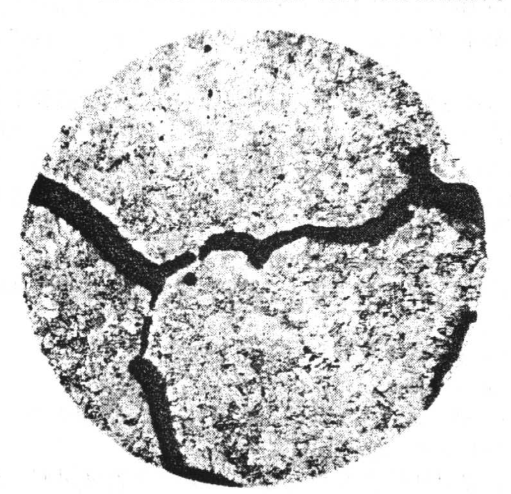


图 10.4-11 GCr15SiMn 钢锻件过烧组织 100×

试样用 4%（体积分数）硝酸酒精溶液浸蚀后呈黑色晶界，明显烧坏，锻坯过烧报废。

防止加热缺陷的措施是：

① 严格执行正确的加热规范。

② 注意装炉方式，防止局部加热。

③ 调准测温仪表，精心加热操作，控制炉温、炉气流动，防止不均匀加热。

（7）白点

白点是锻件在锻后冷却过程中产生的一种内部缺陷。其形貌在横向低倍试片上为细发丝状锐角裂纹，断口为银白色斑点。图 10.4-12 为 Cr－Ni－Mo 钢锻件纵向断口上的白点。其形状不规则，大小悬殊，最小长轴尺寸仅 2 mm，最大的为 24 mm。

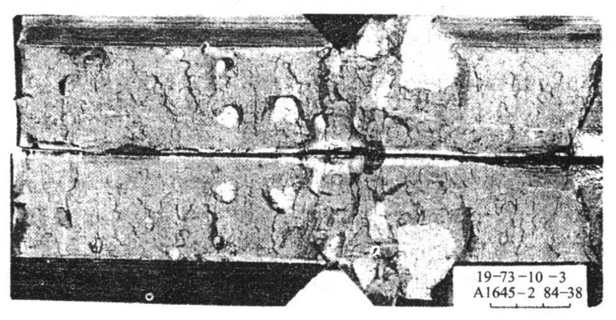


图 10.4-12 宏观断口上的白点形貌

白点实质是一种脆性锐边裂纹，具有极大的危害性，是马氏体和珠光体钢中十分危险的缺陷。

白点成因是钢中氢在应力作用下向拉应力区富集，使钢产生所谓氢脆，同时在拉应力作用下发生脆性断裂，所以氢和附加应力联合作用是白点产生的原因。如果钢中氢含量少，或者氢不发生析出聚集，又没有相变、温差等原因引起的拉应力则不会产生白点。

防止白点的主要措施：

1）降低钢中氢含量，如注意烘烤炉料，冶炼时充分沸腾，真空除气或炉外精炼充分去除氢气等。

2）采用消除白点的热处理，主要任务是扩散钢中氢，消除应力。

（8）组织性能不均匀

大型锻件因其尺寸大，工序多，周期长，工艺因素不稳定，所以常常造成组织性能不均匀，往往在力学性能试验，金相组织检查和无损探伤时发现各处质量差别过大而不能验收。这是由于钢锭中化学成分偏析，夹杂物聚集，各种孔隙性缺陷的影响；加热时温度变化缓慢，分布不均，内应力大，缺陷较多；高温长时间锻造，局部受力局部变形，塑流状况、压实程度、变形分布不均匀；冷却时扩散过程缓慢，组织转变复杂，附加应力大。以上诸因素都可能导致组织性能严重不均匀，造成质量不合格。

提高大型锻件均匀性的措施：

1）采用先进的冶铸技术，提高钢锭冶金质量。

2）采用控制锻造，控制冷却技术，优化工艺过程提高大锻件的均匀性。

（9）淬火裂纹与回火脆性

许多对力学性能与表面硬度要求高的大锻件，锻后要经粗加工，再进行调质热处理或表面淬火。在热处理时，由于温度急剧变化，将产生很大的温度应力。由于相变还产生组织应力，这些应力和锻件内的残余应力叠加，如果合成的拉应力值超过材料的抗拉强度，并且没有塑性变形松弛，将会产生各种形式的开裂和裂纹。例如纵向、横向、表面和中心裂纹，表面龟裂和表层剥离等。由于大锻件截面尺寸大，加



热、冷却时温度分布不均匀，相变过程复杂，残余应力大，而且程度不同地存在着各种宏观和微观缺陷，塑性差，韧性低，这都能加剧裂纹萌生与扩展的过程，往往形成即时的或延时的开裂破坏，甚至炸裂与自然置裂等，造成重大经济损失。

图10.4-13是一支9Cr2Mo钢轧辊表面淬火横向裂纹，在调质淬火加热时出现过热，而且回火不足，心部保留较高的残余内应力，在以后的工频热处理表面淬火时，心部拉应力与残余应力叠加，超过该钢的强度极限，断裂为三段。图示断口表明：裂纹源于过热粗晶的心部，沿径向有放射状的撕裂棱，表层为细瓷状的表淬层。

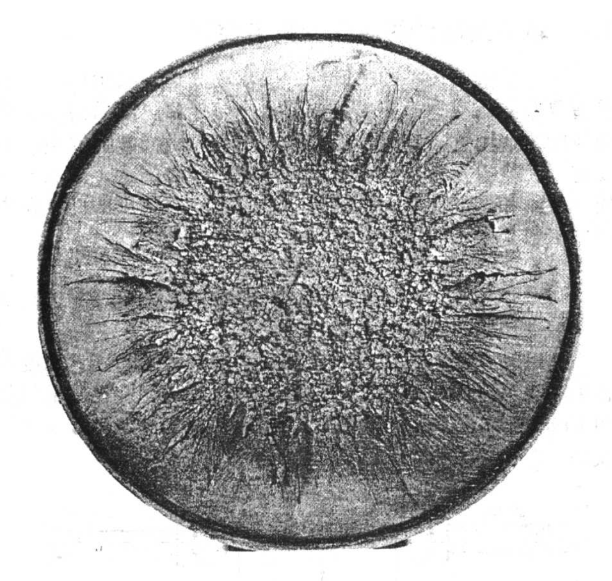


图10.4-13 轧辊表面淬火时横向开裂

防止淬火裂纹的措施是：

1）采用合理的热处理规范，控制加热速度与冷却过程，减少加热缺陷与温度应力。

2）避免锻件中存在严重的冶金缺陷与残余应力。

3）淬火后及时回火。

回火脆性系碳化物析出或磷、锡、锑、砷等有害微量元素沿晶界聚集而引起的脆性增大倾向。

防止回火脆性的措施是：

1）减少钢中有害元素的含量。

2）减少钢中偏析，防止有害组元富集。

3）避免在回火脆性温度区热处理，适当快冷。

2 大型锻件生产过程的质量控制

大型锻件的生产因其关系到重大关键装备的制造，关系到经济发展和国防实力，历来备受关注。50年来，我国大锻件制造业经历恢复重建、自力更生艰苦创业、改革开放创新发展、深化体制改革科技攻关、努力提高质量效益、技术引进及国产化、结构调整技术改造等阶段，在产量、品种、规模、质量与技术等方面都有长足的进展，生产了一批急需的重要锻件，如1988年制造成功600MW火电机组全套大锻件，质量达到美国西屋公司标准。1995年在1 000 kN·M对击锤上模锻成了直径1 300 mm汽轮机叶轮，批量生产的锻件覆盖当时国内市场需求量的50%。1977年以来我国自主开发成功了在普通自由锻水压机上液压胀形强化护环的新技术，在消除有害残余应力、提高使用性能与生产效益方面取得了显著的效果，并且已经成为当今主要的生产手段。还有在生产320MW水轮机大轴，600MW核电锻件，2 050MM热轧辊及高铬钢轧辊，千吨级石油化工压力容器，万吨级船用锻件等方面都取得了相当优异的成绩。尤其在质量水平上有新的跃升。这些标志性成果的取得与我们重视质量是分不开的，从20世纪70年代起我国就针对电站大锻件质量攻关持续开展了一系列的工作，加强了各生产环节的控制，严格进行质量检验，缺陷事故分析，强化质量管理，开展科技攻关研究，在质量控制与新技术研发方面取得了显著的成绩，如应用物理模拟和数值模拟方法以及常温和高温的密栅云纹测试方法等，对FM、WHF、JTS、KD等锻压方法的变形规律，工序设计进行了深入的研究。对管板、封头类锻件中的密集性裂纹进行了科学分析，对大锻件内部类孔隙性缺陷的产生及微观缺陷修复机制进了研究。应用热力学模拟，微观模拟与计算机数值模拟相结合方法对锻压成形可控机制进行了探讨，促进了质量预报、质量控制及新技术开发工作的进展。在用密栅云纹法研究变形、应力、应变分布，塑性泥物理模拟，石腊质材料物理模拟，护环超高压液力成形，护环钢再结晶与细匀化晶粒的研究方面都取得了明显的进步。在1988年前后我国引进了国外大锻件生产技术，而后又开展了较大规模的消化吸收，国产化创新和技术改造工作使大锻件生产水平有明显的提高，比如钢水纯净度和大锻件质量有显著的改善。目前根据市场需求对超临界火电大锻件，大型核电锻件，巨型轮船锻件，大型石化容器，高铬钢轧辊，西气东输及航空航天大锻件，以及模块和环形件等基础产品正在进行质量攻关。

以计算机信息技术为代表的高科技不断溶入大锻件的研究与制造领域，对大型锻件生产中的质量预报、质量控制和大型锻造的科学化现代化发展具有重要的意义。

下面扼要讨论大锻件生产过程的质量控制。

（1）冶炼与铸锭过程的质量控制

通过控制冶炼与浇注过程可以得到纯净度高，结晶结构合理，缺陷少的铸锭或坯料。目前主要举措如下。

1）严格按照技术标准对炉料、辅料和耐火材料加强精选、验收、保管与配料。

2）发展电炉炼钢，重要锻件用钢广泛采用炉外精炼。

3）严格控制浇注温度和浇注速度，推广大钢锭下注法。采用保护浇注，振动浇注，发热冒口及冒口补浇技术。

4）改进冶金附具。采用新的锭型结构和参数，减少钢锭缺陷。

例如：采用真空碳脱氧方法（VCD），钢中气体可降低，[H] =（0.4～1.2）$\times 10^{-6}$，[N] =（10～30）$\times 10^{-6}$，[O] ≤32$\times 10^{-6}$，氧化物总量降至0.001 4%。真空循环脱气（RH）脱氢率65%～70%，脱氧率50%。钢包精炼（LF）脱气后[H] <2$\times 10^{-6}$，[O] <20$\times 10^{-6}$，脱硫率达81%达到[S] =0.002%～0.005%，硫化物和氧化物夹杂小于1.0级和1.5级。电渣重熔（ESR）脱氢率30%～50%，脱氧率40%～60%，脱硫率40%～50%，去除夹杂率40～60%，而且，成分均匀，无明显偏析，组织致密，塑性良好，结晶结构合理，污染少。可见通过电炉炼钢加炉外精炼，钢液质量能得到明显的改善。

再如，合理的锭型也能改善钢锭质量。对特大锻件如转子、轧辊可以采用短粗型钢锭，其高径比为1～1.5，大锥度（8%～12%）大冒口（25%以上）。该类型钢锭有利于夹杂物上浮和气体逸出，减少偏析。空心钢锭用于锻造环筒类大锻件不仅材料利用率高，节省加热燃料消耗，而且偏析疏松少，表面质量好。随着冶炼，铸造技术的进步，采用异形锭，连铸坯乃至铸锻联合成形方法制坯会逐渐增多，这对提高大锻件的质量具有积极的作用。

采用数值模拟和物理模拟的方法研究钢锭凝固过程的温度场、流场和应力场，对提高钢锭的质量具有重要意义。例如清华大学、第一重机厂开发应用了MISP软件，计算了钢

锭凝固时的温度场变化并较准确地确定了不同时刻凝固的前沿，还能预测缩孔及疏松的位置及尺寸，优化钢锭结构，以205t钢锭代替原用的220t钢锭，而且避免了疏松缩孔进入锭身区。图10.4-14表示了工艺改进前后缩孔疏松的模拟结果。由图可知改进后缺陷上移，尺寸减小。

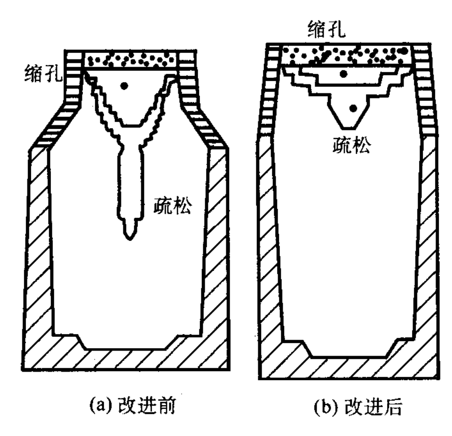


图10.4-14 钢锭凝固时疏松与缩孔示意图

(2) 加热与锻造过程的质量控制

合理的加热对控制大锻件的质量有重要的作用。所谓合理的加热主要指升温速度合理，控制钢锭内外温差防止温度应力过大使锻件产生裂纹破坏。实践证明：对高合金钢、低塑性材料的加热速度应严加控制，可采用降温装炉，分段加热的方法防止加热裂纹。提倡热坯料加热（表面温度不低于600℃的材料称为热钢锭或热坯料）。其次要控制加热温度范围。加热温度的上限以不产生过热、过烧为度。因为粗晶及局部烧坏对锻压工艺及产品质量会产生不良的影响。但是随着冶炼技术和热处理技术的进步，加热温度有提高的趋势。另外，均匀加热合理的保温可以强化高温扩散机制，有利于组织结构的均匀化，有利于空隙性微缺陷在锻合压实时的热修复。

锻造中间再加热应考虑后续工序的变形量，当剩余锻造比（K）大于1.6时，可按最高允许加热温度加热；当$K<1.3\sim1.6$时，加热温度应控制在1 050℃左右；当$K<1.3$时，加热温度不高于950℃，以避免因小变形高温停锻，在锻件中形成粗晶组织。对因故障不能出炉锻造的锻件，炉温应控制在800℃以下。

锻造变形是提高大锻件质量的重要手段。因为合理的变形能打碎铸态结构，压实空隙疏松，细化晶粒、均匀杂质分布，还能形成合理的流线，提高锻件力学性能。实践证明：理想的锻造组织性能和锻压的热力学因素有密切的关系。如果能科学地控制锻压成形过程中温度因素保持高低适宜、均匀热透、充分高温扩散、不发生加热缺陷，在锻造变形时变形速度合理，变形程度及变形分布合适，应力状态良好，热成形过程中动态再结晶与静态再结晶能得到有效的控制，则锻件的组织性能会显著提高。可见控制好锻造过程中的热力学因素是热成形质量控制中的重要环节。因此，应进一步加强热力学模拟和计算机数值模拟研究。通过定量计算，数字图形显示，方便快捷，系统全面地给出制件在成形过程中的各种数据信息与场量信息。通过热力学模拟，微观模拟和数值模拟相结合，优选热成形方法和优化工艺参数，以使大锻件锻造质量的控制更趋完善。

(3) 锻件冷却与热处理的质量控制

在深入研究热传导、温度分布与相变、扩氢、再结晶细匀化晶粒、松弛消除内应力、稳定组织、调控性能的关系之后，合理制订锻件冷却规范和锻件热处理制度。通过控制加热速度、冷却速度、保温时间、过冷温度等参数，达到扩散氢气，消除应力以防止白点，降低硬度，便于机械加工。调整预备组织以利于超声波探伤和最终热处理，通过最终热处理得到需要的使用性能。

3 大型锻件质量分析与控制举例

大型锻造的质量、效率和技术经济水平的提高，是一个系统工程，必须在炼钢、锻造、热处理、粗加工和质量检查各环节，采取有效措施，同时注重加强管理。多年来我国大型锻件生产行业经过艰苦努力，使得轧辊、转子、叶轮、护环、封头、空心件、模块、曲轴等大锻件质量提高到一个新的水平。现以转子、护环和叶轮为例介绍如下。

3.1 转子类锻件的质量分析与控制

转子是电站设备的关键件，要求在高速下安全运行，承受着复杂的高应力，技术条件要求十分严格。然而由于影响质量的冶金因素，热力学因素难以控制，因而缺陷较多，主要有：大块或密集性的非金属夹杂物，残余缩管、白点、疏松、裂纹和力学性能不合格等。汽轮发电机转子锻件，在生产中多数是因为超声波探伤不合格而报废。

(1) 12MW转子锻件夹杂物缺陷

该转子钢为34CrMolA，钢锭经真空碳脱氯（VCD）处理、锻件用正火调质热处理。

该锻件在超声波探伤时，发现两处密集缺陷区，深度在距中心50 mm半径范围内。缺陷轴向位置与钢锭相应部位如图10.4-15所示。轴身密集区内有两处大于$\phi12$ mm当量的缺陷。

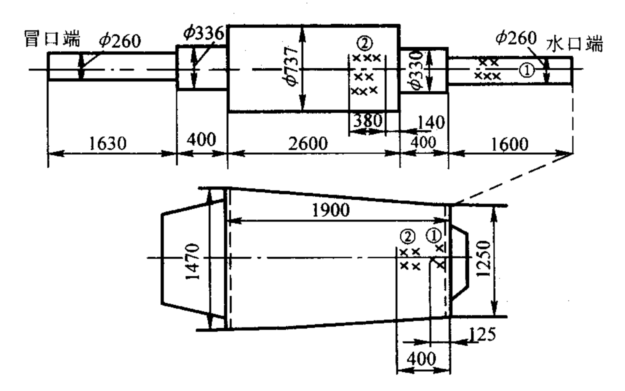


图10.4-15 转子锻件与钢锭缺陷的对应部位

根据剥离切块宏观检查，发现有长度超过2 mm，直径约1 mm，方向平行于转子轴线的黑色粉末状夹杂物。群集缺陷尺寸达55 mm×10 mm和35 mm×12 mm。经金相法鉴定和扫描电镜分析确定为非金属夹杂，而不是裂纹或缩管残余。X光结构分析认为是铝硅酸盐，而且属同一来源的非金属夹杂物。经显微镜高倍观察，可见大型非金属夹杂周围基体金属的纯净度很高，说明该夹杂系外来物，非炼钢时脱氧的内生产物。从夹杂物成分分析来看其属于耐火材料侵蚀物。其来源是，当钢水进行真空碳脱氧（VCD）时，真空度、脱氧制度与浇注参数调节不好，匹配不当，造成钢流不能很好分散而成股状，加上浇注温度偏低，注速较慢，使钢锭凝固条件恶化。这样被侵蚀的混入钢水中的非金属夹杂物将沉积于锭底黏稠区，来不及上浮而埋入钢锭内部，形成大体积的夹杂物沉集锥。在锻造时锭底切除量不足，于是在锻件内残留下此种缺陷。

(2) 12MW转子锻件轴身部位a_K值低于规定指标

12MW转子锻件，材质为34CrMolA钢，锭重19 t，三火锻成，经一次中间镦粗。锻后等温退火，并作正火、调质热处理。



经性能检测，该件的力学性能变化如图 10.4-16 所示，轴心纵向强度 σ_b 和 σ_s 值，由冒口端到底部端呈递减趋势，而 δ 和 a_K 值，则由冒口端向水口端递增。在轴身部位"八"型偏析区 a_K 值低于规定指标。

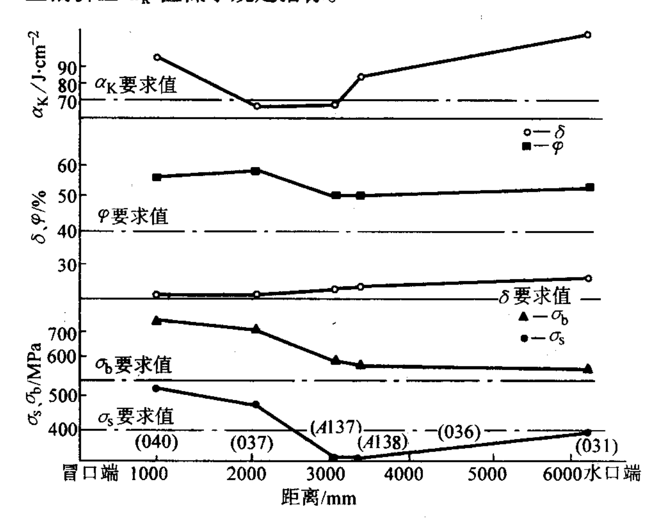


图 10.4-16　转子纵向力学性能沿轴向的变化

转子经解剖，沿纵轴方向切开，作硫印图，如图 10.4-17 所示。由图可见，钢锭的区域偏析在锻造时随变形状况发生相应变化。在变形压下量较大处，偏析带较窄，而变形较小的转子轴身部位则偏析带较宽。

夹杂物的分布：冒口端以硫化物为主，形貌呈条带状，而水口端以氧化物为主，呈链状或堆聚状分布，这和夹杂物偏析程度、性质有对应关系。

化学成分偏析沿轴向纵剖面分布变化如图 10.4-18 所示。其中碳、硫、铬、钼含量，由钢锭冒口端向底部水口端呈递减趋势。

另外，由低倍观察和性能试验得知：沿横截面，边缘为细晶致密区，显微组织为索氏体，强度指标较高，中心呈被打碎的粗晶和被压合之疏松结构，显微组织中有块状铁素体，强度较低，而塑性、韧性在偏析区较低。这和钢锭结晶结构特征及锻压、热处理效果基本对应。

综观上述成分偏析和组织分布引起性能不均匀的情况，可见该转子锻件的缺陷，基本保留了铸锭缺陷的特征。

因此，减少钢中夹杂和钢锭偏析是首先应该重视的问题，否则，钢中夹杂多，钢锭偏析严重，靠锻造与热处理难以生产出优质的转子锻件。所以，转子钢的冶炼和浇注应引起极大的重视。对原材料的精选、炉料的烘烤、冶炼制度的完善，浇注系统的清洁等，都应严格要求。

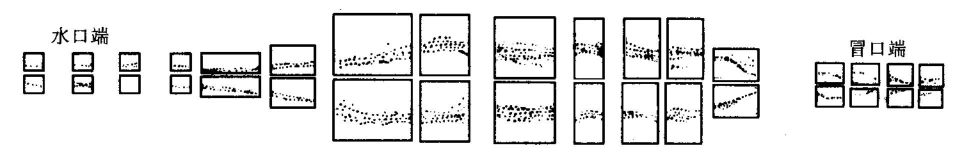


图 10.4-17　转子轴向硫化物偏析分布示意图

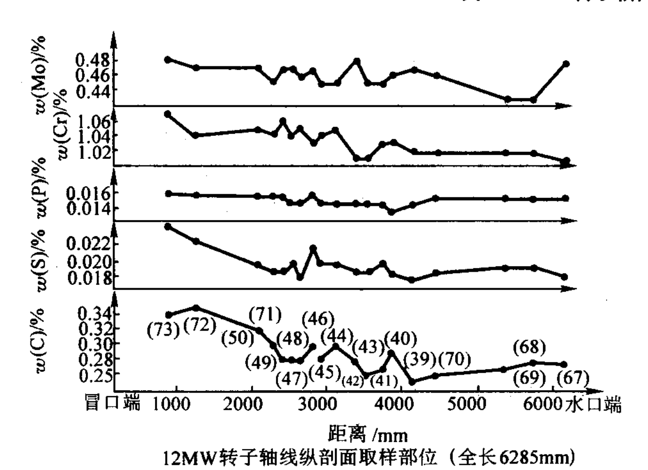


图 10.4-18　转子轴线纵剖面化学成分的变化

锻造虽然可以消除钢锭的枝晶偏析，但对于区域偏析，如钢锭底部的负偏析区和钢锭冒口端碳、硫、磷、疏松等聚集区，锻造作用不大，只有增加钢锭底部端和冒口端的切除率，才能减少其不良影响。冒口端一般切除 25%～30%，底部端一般为 10%～20%。随着钢锭重量增加，钢锭的负偏析愈严重，疏松、晶间裂纹等缺陷也相应的增加，这就使得锻压、焊合内部缺陷，改善钢锭中心质量更为困难。由于转子轴身直径大，因此如何提高锻透性，对于转子的锻造来讲，就显得格外重要。宽砧大压下量拔长和中心压实法是目前解决这一问题常采用的工艺措施。如锻造工艺中需用镦粗工序时，为充分焊合钢锭内部缺陷，打碎铸态组织，改变夹杂物的分布状态，不论一次镦粗，还是两次镦粗，只要水压机能力许可，应使镦粗变形程度大于 40%～50%。

转子锻件的轴线与钢锭中心线尽量不能偏移。这就要求钢锭与钢坯必需烧透，在锻造过程中，变形要均匀，压台阶时要仔细，避免偏心。

（3）600MW 转子质量控制要点

600MW 汽轮机低压转子最大直径为 ϕ925 mm，最小直径为 ϕ730 mm，总长度 8 800 mm，用 238 t 重的 25Cr2Ni4MoV 钢锭锻成。由于转子在高速旋转的复杂应力作用下工作，为确保大型火电机组正常安全运行，要求制件应具备均匀的高强度，优良的韧性，可靠的力学性能，残余内应力最小，为此规定了极其严格的技术条件。例如，化学成分的波动范围必须控制；[H]、[O]、[N] 等有害气体含量要在许可范围内；各处取样进行力学性能检验；全部进行无损探伤。超声波探伤，起始灵敏度为 ϕ1.6 mm 当量，底波衰减不大于 20%；中心孔潜望镜窥视和磁粉探伤表层缺陷；金相评定晶粒度和夹杂物等级、性质；还有形状尺寸精度、表面粗糙度要求等。为了避免缺陷产生，采取如下措施进行质量控制。

1）精炼钢水。根据现实生产条件，采用电炉加平炉供应低磷、高温粗炼钢水。而后倒入钢包炉（LF）二次精炼，去除夹杂物与有害杂质，进行真空碳脱氧（VCD），吹氩搅动，充分除气、脱硫，提高钢水纯净度。控制注温、注速，真空浇注成 24 棱短粗型大钢锭。并用发热冒口，保证充分补缩。

2）充分锻透压实。锻压采用三次镦粗，每次变形量均大于 40%；四次宽砧高温强压法（WHF）保证充分变形。使用设备为 12 000 t 水压机，砧子宽度为 1 700 mm，锻压砧宽比在 0.61～0.83 间变化；中心压实法（JTS）锻压，采用四面加压，每次压下率为 8%，内外温度差大于 350℃，保证芯部能有效压实。该锻件共用 8 火锻成。锻造温度范围为 1 260℃～750℃，冒口端切除量 28.5%，水口端切除量 11.5%，钢锭利用率 50.4%。该方案经过模拟试验与理论研究，与国内外同类方案对比，经济可靠。

3）三次高温奥氏体化和四次过冷的细化晶粒锻后处理和激冷深冷调质热处理。

25Cr2Ni4MoV 钢因有奥氏体粗晶及组织遗传性倾向，为了细化晶粒，均匀组织，应严格控制最后一火的加热温度与变形量。采用三次高温正火，充分过冷，有利于减少残余奥氏体量，充分扩散氢气。为了防止直径差过大，造成冷却不均匀现象，当最小截面冷到 400℃时用包石棉布保温，均匀缓冷，防止裂纹。

调质处理采用大水量强喷水淬火工艺，以得到更多的马氏体和贝氏体组织，改善断裂韧度。同时在转子本体部位适当开槽，增加冷却表面积，提高淬透深度，得到良好的心部组织。为了减少变形和防止裂纹，在转子的不同部位，采用不同喷水量的冷却工艺，使制件各部位获得大致相同的冷却速度，从而得到良好的淬火效果。调质处理后进行机械加工和套取芯棒，检查中心孔质量。

该转子质量检查结果：超声波探伤，未发现 $\phi1.6$ mm 以上的当量缺陷。低倍观察：硫印为 0.5 级；酸洗未见异常现象。沿转子轴身径向套试料和中心试料进行高倍检查，塑性夹杂 0.5～1.5 级，脆性夹杂 0.5～1.5 级，晶粒度 5～6 一级，中心孔试料高于径向试料。化学成分，气体含量检查全部符合技术条件，其中含 S≤0.003%，含 P≤0.008%，[H] ≤0.79 (10^{-6})，[O] ≤27 (10^{-6})。力学性能，残余应力检验全部优于技术规定。中心孔检查未发现缺陷，尺寸检查满足图样要求。综合全部质量检验结果，均达到了美国西屋公司订货标准。

3.2 护环锻件的质量分析与控制

护环也是火电设备中的关键大锻件，它热装于发电机转子两端，用来紧箍高速旋转的端部绕组，要求高强、高韧、均匀、无磁、最小的残余内应力、良好的抗应力腐蚀能力。目前，多用 Mn-Cr 系奥氏体高强度钢锻坯，粗加工，最后经变形强化提高性能，技术含量高，制造难度大。

护环沿用 50Mn18Cr4 型钢制造。由于该钢抗应力腐蚀能力比较弱，故有用 Mn18Cr18N 抗应力腐蚀钢取代的趋势。

高锰、高氮奥氏体护环钢合金元素多、强度高、晶粒粗、塑性差，因而冶炼时保持高合金量、高氮量、均匀组织性能、锻造时防止开裂，一直是生产中的难题。所以，优化工艺参数，控制工艺过程，提高产品质量的可靠性，长期以来是国内外关注的焦点。下面举例简要介绍护环生产中常见的缺陷以及大型护环的质量控制措施。

（1）护环热锻过程中的开裂

护环坯在热成形过程中开裂，常见于镦粗、冲孔及芯棒拔长等工序，其原由是工艺塑性不良，应力状态不佳。

Mn-Cr 系护环钢，由于铸锭晶粒粗大，柱状晶带发展，过热敏感，故可锻性较差，热锻时容易开裂。应采用合适的锻造温度范围和成形方法。

50Mn18Cr4 型护环钢的始锻温度选 1 180℃～1 200℃为宜。该钢种在 660℃～800℃范围内材料塑性显著降低，因此终锻温度应该严格控制在 850℃以上。

Mn18Cr18N 钢与 50Mn18Cr4 对比，化学成分显著不同点是：铬含量高、氮含量高、碳含量低。所以钢的热塑性明显降低，热锻开裂倾向增大，因而防止热锻裂纹尤为重要。可以采取控制锻造的方法，即严格控制热锻温度范围、控制应变速率，改善变形应力状态。这样不仅能防止裂纹缺陷，而且能提高内在质量。

镦粗开裂是由于切向拉应力过大或温度低塑性差形成的。选用合适的变形温度和镦粗变形量，或者在模内镦粗改善应力状态，可以防止此类缺陷。

50Mn18Cr4 型钢再结晶温度（约 750℃～800℃）高，软化能力弱。镦粗时坯料上、下端面金属温度降低得很快，当较大的镦粗变形后，如金属硬化得不到恢复，再马上冲孔，则由于端面塑性低，孔口部位常易产生裂纹。如果将镦粗和冲孔分别在两火次进行，则可避免此类缺陷。

芯棒拔长的开裂，常见于坯料端部和内孔，主要原因是应力状态不良和变形温度低。图 10.4-19 所示为采用上平下 V 形砧进行芯棒拔长时，由于每压一次坯料呈椭圆形，在孔内壁受拉应力与切应力作用，并且反复交变，结果产生了裂纹。其次由于冲孔后常常有毛刺加上坯料温度降低，如紧接着拔长，便可能产生裂纹。防止该类缺陷的方法，一是采用上下圆弧砧拔长，改善应力状态；二是冲孔与芯棒拔长分别在两火次内进行，保证材料的高温塑性良好。

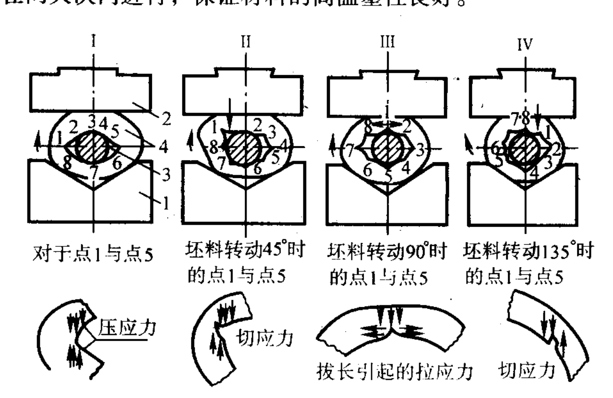


图 10.4-19 护环坯芯棒拔长时端部裂纹的形成示意图

（2）护环的组织性能不均匀

Mn-Cr 型奥氏体护环钢系本质粗晶粒钢，假如锻造时热力学因素控制不合理，极易产生粗大不均的晶粒组织。尤其当钢锭中偏析发达，粗晶严重，热锻时，变形分布不均者，这种缺陷更为明显。图 10.4-20a 示出了 50Mn18Cr4 钢制的 6 MW 护环，晶粒度差别 1～3 级。图 10.4-20b 表示出沿晶界有少量颗粒状碳化物析出，它将影响护环的电磁性能。

有的大型护环晶粒度分布不均匀现象更为严重，甚至在加工后的表皮上，可见大片不均匀粗晶的痕迹。组织不均必然导致性能差异，有的护环沿圆周屈服强度（$\sigma_{0.2}$）波动范围达 100 MPa 以上。组织性能的均匀性是评价护环质量的重要指标。因为均匀的组织性能，意味着不会发生局部破坏，使用更安全。提高钢的纯净度与均质性，严格工艺纪律，控制合理的温度分布与变形分布，可以获得比较均匀的组织和性能。

（3）护环液压胀形强化中的缺陷

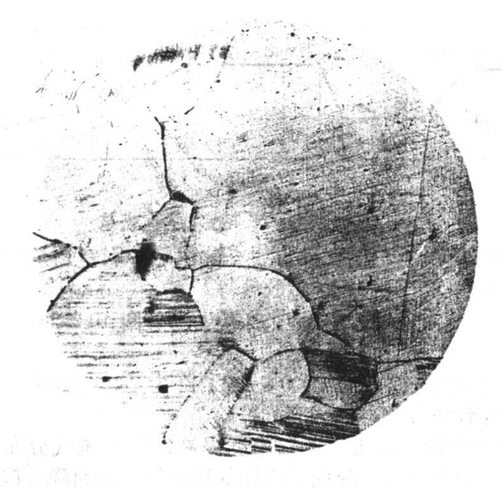
液压胀形系利用超高压水，使环坯受内压产生扩孔变形。液压胀形可能产生"喇叭口"和胀裂等缺陷。

护环液压胀形时出现"喇叭口"缺陷的原因是：液压胀形时护环内部传压介质尚未及时建立起高压，或者高压状态没能很好地保持，那么环坯在锥形冲头轴向下压时水平分力过大引起环坯失稳变形，在两端产生局部扩口，形成"喇叭口"缺陷。其受力变形状况如图 10.4-21 所示。相反假如两端变形阻力过大，中部也会受内压胀成鼓形。凹腰和鼓肚都是局部变形所致，这种畸形缺陷影响护环质量，必须合理调控胀形机制使其产生均匀胀形予以克服。

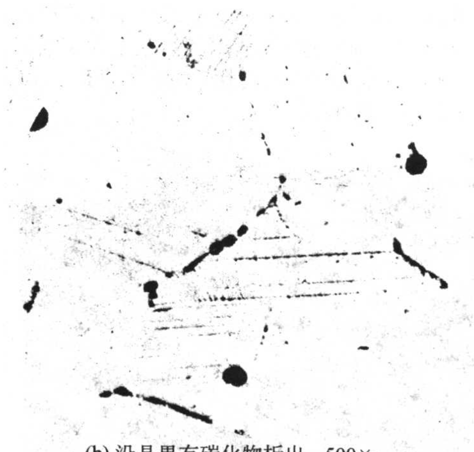
胀裂如图 10.4-22 所示。胀形强化时开裂的原因是：环坯组织性能不均匀，在力学性能较差部位发生开裂现象。另外，原材料缺陷、塑性韧性不良、机加工缺陷、残余应力等都会导致胀裂。

因此护环液压胀形时首先要及时建立并保持胀形所需的高压强。同时要监控液压胀形过程，实现计算机控制液压胀形，防止不均匀胀形与胀裂破坏，确保胀形的高质量。





(a) 晶粒大小不均　100×



(b) 沿晶界有碳化物析出　500×

图 10.4-20　50Mn18Cr4 钢锻件的不均匀晶粒组织

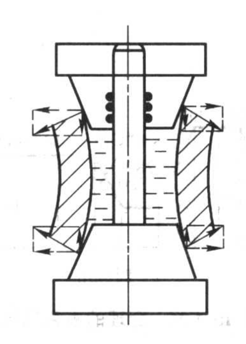


图 10.4-21　护环产生喇叭口缺陷示意图

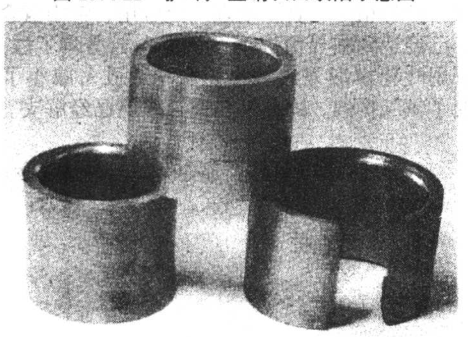


图 10.4-22　液压胀形护环的缺陷

(4) 300MW 护环生产质量控制

生产流程为：冶炼、铸锭—锻制重熔电极（亦可铸造电极）—电渣重熔（ESR）—热锻制坯与控制冷却（控制锻造与高温形变热处理）—粗加工—变形强化（液压胀形或楔块模具扩孔法）—去应力处理—检验、包装。

鉴于高强度与抗应力腐蚀的要求，选用 Mn18Cr18N 钢。该钢中含碳量低（w（C）$\leqslant 0.12\%$），氮高（w（N）$\geqslant 0.4\%$），铬高（w（Cr）$= 17.5\% \sim 20.0\%$），硫、磷低（w（P）$\leqslant 0.05\%$，w（S）$\leqslant 0.015\%$），且总合金量占钢水总量 50%以上，冶炼难度很大。在电炉上采用氧化法为主的操作，得到满意的化学成分。

重熔中采用 CaF_2 和 Al_2O_3 为主的渣系，注意电功率不宜过大，熔化速度不宜过快的原则，保证了电渣锭的质量。

加热与锻压：Mn18Cr18N 钢系奥氏体本质粗晶粒钢，高塑性温度区间较窄，热加工变形抗力较大，有很强的过热敏感性。为了得到细小均匀的组织结构，必需合理制定加热规范，严格控制热力学因素，实行控制热成形与控制冷却方案，即控制温度与变形的参数和最佳匹配关系。变形后，控制高温停留时间，控制入水冷却速度，以得到良好的形变热处理效果。经过该方案制成的环坯，组织细小均匀，工序简化，综合力学性能高，为下步变形强化，提高性能奠定了良好的基础。

为防止过热和晶粒过于粗大以及碳化物大量析出，最后一火锻造温度范围取为 1 180 ~ 900℃。

电渣锭的锻造工序为：轻压滚圆，压下量为 20 mm 左右；镦粗、冲孔时要防止鼓肚裂纹与毛刺；然后芯棒拔长，芯棒扩孔，要求转动均匀，每次压下要均匀锻透，锻压过程中发现裂纹及时清理，以防裂纹扩大。

扩孔强化大型护环需在 120MN 水压机上用楔块模具冷扩孔强化，或减压法液压胀形强化，在形变强化过程中应合理控制工艺参数，保证均匀变形。

最后经 330 ~ 350℃，12 h，稳定尺寸，消除应力回火。

质量检验结果：化学成分达到用户要求及美国西屋电气公司标准。其中 N 含量检查结果为 w（N）0.52% ~ 0.60%，用户要求 w（N）$\geqslant 0.4\%$，西屋公司要求 w（N）$\geqslant 0.50\%$。力学性能全部达到标准，其中 $\sigma_{0.2}$ 用户和西屋公司要求为 1 030 ~ 1 170 MPa，检查结果为 1 074 ~ 1 083 MPa，伸长率 δ_5：要求为 20%，实际为 20.5% ~ 25%。

晶粒度规定标准为优于 1 级，检验结果为 5 ~ 4 级。

磁导率，要求 $\mu \leqslant 1.1$，实际 $\mu = 1.001\ 5$。尺寸检查符合图样要求。

超声波探伤，要求纵波 $\leqslant \phi 2$ mm 缺陷，实际未发现 $\geqslant \phi 1.6$ mm缺陷。横波，未发现$\geqslant \frac{1}{2}$基准线的回波。

液体渗透探伤检查未发现缺陷痕迹显示。

综上所述，以上工艺方案、工艺参数、质量控制技术是可靠的，产品全面满足用户订货条件，达到了美国西屋电气公司 P.D.S10725 标准的 BR 级指标，相当 20 世纪 80 年代国际水平。

3.3　叶轮白点的防治

白点是大锻件中常见缺陷之一。白点实质是一种高应力集中的脆性裂纹，能够引发灾难性事故、危害相当严重。白点是钢中氢含量高、内应力大两者共同作用的结果。在炼钢技术落后的年代，白点只能通过热处理扩氢加以控制，这个过程冗长而困难、所以白点成为大锻件中重要的缺陷。下面以 25MW12 级汽轮机叶轮为例介绍这一控制质量事例。该叶轮的生产流程为：电炉炼钢—铸锭—锻造—消除白点等温退

火—粗加工—探伤—调质—试验。

锻件粗加工后经超声波探伤，发现内部缺陷严重。检查锻件的横向低倍和纵向断口，发现低倍上有大量细裂纹（图 10.4-23），断口上有大量白点，其中最大的竟达 8 mm × 5 mm 和 13 mm × 2 mm（图 10.4-24）。



图 10.4-23　34CrNi3Mo 钢叶轮锻件横向低倍上的裂纹

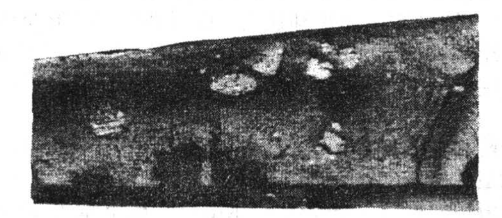


图 10.4-24　纵向断口上的白点

白点产生原因如下：

1）炉料水分多，尤其是雨季生产，由于烘烤不充分，钢中含氢量增高。

2）去氢规范不合理（图 10.4-25），它不能保证锻件中心及近表面的氢气充分扩散，因此不能消除白点。

防治措施：

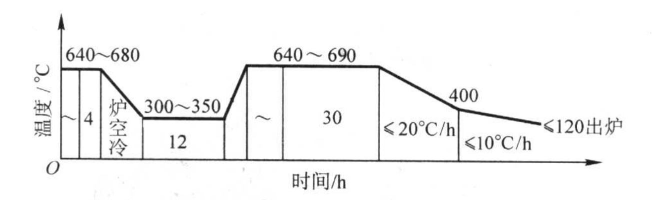


图 10.4-25　不合理的去氢规范

1）降低钢中氢含量，如充分烘烤炉料，冶炼时充分沸腾，真空除气，炉外精炼脱气等。

2）制定合理的热处理去氢规范（图 10.4-26），其要点是：

① 把过冷温度从 300 ~ 350℃降为 280 ~ 320℃，使过冷奥氏体较快分解，氢气充分扩散。

② 增加一次重结晶，用以提高锻件中氢气分布的均匀性，并细化晶粒，降低奥氏体的稳定性，从而降低锻件对白点的敏感性。

③ 降低扩氢后的缓冷速度和出炉温度，有利于氢气的扩散。

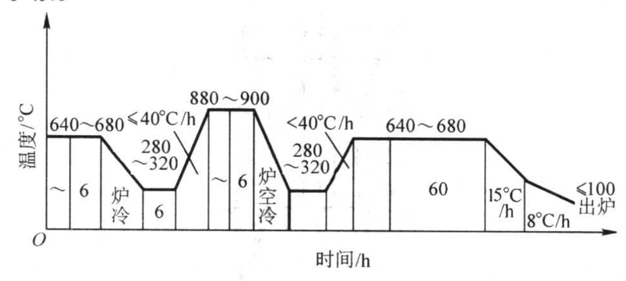


图 10.4-26　合理的去氢规范

现在，炉外精炼、真空处理广泛应用，钢中氢含量大幅度降低，已经达到临界值以下，从根本上消除了白点隐患。另外，采用叶轮模锻方法冲出轮毂中心孔，减小了制件厚度，方便了氢气扩散，因此叶轮白点难题已经解决。

编写：郭会光（太原重型机械学院）

第 5 章　锻件质量检验的内容和方法

锻件缺陷的存在，有的会影响后续工序处理质量或加工质量，有的则严重影响锻件的性能及使用，甚至极大地降低制成零件的使用寿命，危及安全。因此为了保证或提高锻件的质量，除在工艺上加强质量控制，采取相应措施杜绝锻件缺陷的产生外，还应进行必要的质量检验，防止带有对后续工序（如热处理、表面处理、冷加工）及使用性能有恶劣影响的缺陷的锻件流入后续工序。经质量检验后，还可以根据缺陷的性质及影响使用的程度对已制成的锻件采取补救措施，使之符合技术标准或使用的要求。

因此，锻件质量检验从某种意义上讲，一方面是对已制锻件的质量把关，另一方面则是给锻造工艺指出改进方向，从而保证锻件质量符合锻件技术标准的要求，并满足设计、加工和使用上的要求。

1　锻件质量检验的内容

锻件质量的检验包括外观质量及内部质量的检验。外观质量检验主要指锻件的几何尺寸、形状、表面状况等项目的检验；内部质量的检验则主要是指锻件化学成分、宏观组织、显微组织及力学性能等各项目的检验。

具体说来，锻件的外观质量检验也就是检查锻件的形状、几何尺寸是否符合图样的规定，锻件的表面是否有缺陷，是什么性质的缺陷，它们的形态特征是什么。表面状态的检验内容一般是检查锻件表面是否有表面裂纹、折叠、折皱、压坑、橘皮、起泡、斑疤、腐蚀坑、碰伤、外来物夹杂、未充满、凹坑、缺肉、划痕等缺陷。而内部质量的检验就是检查锻件本身的内在质量，是外观质量检查无法发现的质量状况，它既包含检查锻件的内部缺陷，也包含检查锻件的力学性能，而对重要件、关键件或大型锻件还应进行化学成分分析。对于内部缺陷我们将通过低倍检查、断口检查、高倍检查的方法来检验锻件是否存在诸如内裂、缩孔、疏松、粗晶、白点、树枝状结晶、流线不符合外形、流线紊乱、穿流、粗晶环、氧化膜、分层、组织过热和过烧等缺陷。而对于力学性能主要是检查常温抗拉强度、塑性、韧性、硬度、疲劳强度、高温瞬时断裂强度、高温持久强度、持久塑性及高温蠕变强度等。

由于锻件制成零件后，在使用过程中其受力情况、重要程度、工作条件不同，其所用材料和冶金工艺也不同，因此不同的部门依据上述情况并按照本部门的要求将锻件进行分类，不同的部门，不同的标准对锻件的分类也是不同的。但不管怎样，对于锻件质量检验的整体来说都离不开两大类检验，即外观质量和内部质量的检验，只不过锻件的类别不同，其具体的检验项目、检验数量和检验要求不同罢了。例如，有的工业部门将结构钢、不锈钢、耐热钢锻件分成4类进行检验，有的部门将铝合金锻件和模锻件按其使用情况分成3类进行检验，还有的部门将铝合金、铜合金锻件分类进行检验。表 10.5-1 是结构钢、不锈钢、耐热钢锻件分成4类的检验要求，表 10.5-2 是铝合金锻件和模锻件的质量检验要求。

表 10.5-1　结构钢、不锈钢及耐热钢锻件质量检验要求

类别	热处理状态	检验项目和数量						
		材料牌号	表面质量和几何尺寸	硬度	力学性能	低倍	断口	晶粒度
Ⅰ	预备	100%检验	100%，当能确保质量时，模锻件的几何尺寸允许抽检	每热处理炉抽检10%，但不少于3件	每熔批抽检1件	每熔批抽检1件	每熔批抽1件在本体上检验，其余100%在专用余料上检验	每熔批抽检1件
	最终			100%	每熔批抽1件在本体上检验，其余100%在专用余料上检验			
Ⅱ	预备			每热处理炉抽检10%，但不少于3件	每熔批抽检1件	每熔批抽检1件	按需要每熔批抽检1件	需化学热处理的零件和有需要的其他件，每熔批抽检1件
	最终			100%	每验收批抽检1件或试料上检验			



续表 10.5-1

类别	热处理状态	检验项目和数量						
		材料牌号	表面质量和几何尺寸	硬度	力学性能	低倍	断口	晶粒度
Ⅲ	预备	100%检验	100%，当能确保质量时，模锻件的几何尺寸允许抽检	每热处理炉抽检 5%～10%，但不少于 3 件	不检验	首批生产或改变主导工艺时抽 1 件检验金属流线和工艺缺陷	不检验	按需要
	最终			100%				
Ⅳ	预备			每热处理炉抽检 5%～10%，但不少于 3 件	不检验	不检验	不检验	按需要
	最终			每热处理炉抽检 10%，但不少于 3 件，若有一件不合格，则 100%检验				

注：1. 各类锻件，无论是否有检验断口的要求，当怀疑锻件过热时，应增加断口检验，奥氏体钢锻件不检查断口。
2. 如另有检验要求，可在专用技术文件中规定进行检验。

表 10.5-2 铝合金锻件及模锻件质量检验要求

类别	检验项目和数量							
	表面质量和几何尺寸	化学成分	力学性能		显微组织	断口	低倍	超声波探伤
			抗拉性能	硬度				
Ⅰ	100%	每熔次抽检一件	余料部位 100%和每批（炉）抽检一件	不检验	每批（炉）抽检一件	需方有要求时每批抽检一件	每批抽检一件	需方有要求时，每批 100%
Ⅱ	100%		每批（炉）抽检一件	100%				
Ⅲ	100%		不检验	100%		不检验	首批或工艺改变时抽检一件	

注：1. 化学成分可由原材料保证。
2. 在确保质量的前提下，Ⅲ类件的硬度每批可抽检 5%且不少于 5 件。
3. 低倍和断口组织检查不允许重复试验。

下面就不同材料和不同规格锻件的内部质量检验内容作一简要介绍。

（1）材料类型不同，检验项目不同

对一般钢锻件，都是在预备热处理状态切取试样，经规定的热处理后，检验力学性能、断口和晶粒度等。对于奥氏体钢、高温合金、铝合金、镁合金、钛合金和铜合金锻件，是在最终热处理状态的锻件上直接取样，检验力学性能和低倍等。

对一般钢锻件，只作常温拉力、冲击两项试验。对于高温合金锻件，要作高温性能试验。对高温合金、铝合金、镁合金、铜合金锻件，一般不做冲击试验。

对奥氏体钢、高温合金锻件，一般不做断口检验。

对合金结构钢锻件，要做本质晶粒度检验。对其他材料锻件，要做实际晶粒度检验。对零件不进行化学热处理的合金结构钢锻件，都做实际晶粒度检验。对高温合金、奥氏体钢、铝合金、镁合金、钛合金锻件，要检查晶粒度。对工具钢、不锈钢、钛合金、铝合金、碳钢、低碳合金结构钢锻件，要检查高倍组织。

另外，对于某些重要的耐热不锈钢锻件，要作晶间腐蚀检验。对于磁性材料锻件，要做导磁、导电性能检验。

（2）锻件规格不同，检验项目不同

水压机生产的大型自由锻件与一般锻件相比，其检验特点是：

1）除要检验力学性能外，还要作残余应力测试和冷弯试验。

2）大型自由锻件，多半由钢锭直接成形。锻件检验也是材料的质量检验，要做化学成分和横向低倍检验，而一般中小锻件的化学成分分析在原材料检验时进行，锻件要作纵向低倍分析，检验流线分布。

3）大型锻件要留试验余料，进行逐件检验。而对于中小型锻件，只按熔批破坏锻件抽检。

4）对锻件要逐件进行超声波探伤，检验内部缺陷。



近年来，锻件的无损检验获得了日益广泛的应用，它主要包括射线检验、超声波检验、磁力探伤、表面渗透检验等（见本章第2~4节）。

在锻件表面质量方面，铝合金模锻件在交付检查前，必须进行酸洗，重要锻件还应经过阳极氧化处理。表面应该光滑和干净。待加工表面上的裂纹和腐蚀痕迹必须全部清除掉。点状夹杂、折叠、起皮、气泡、疏松、缩孔、偏析痕迹、碰伤、外来异物、暗斑和白斑以及其他缺陷，允许在交付检查前清除，但清除以后的表面必须保证锻件还有1/3的名义加工余量。

非加工表面上的上述影响使用性能的缺陷必须全部清除。缺陷清除以后，仍须保证该处具有锻件图上规定的单面最小极限尺寸，孔和槽的情况则相反。

钛合金模锻件的表面不允许有裂纹和折叠等缺陷。如果有这些缺陷存在，允许用打磨方法清除，但清除以后的表面必须保证锻件至少还有1/2以上的机械加工余量。

钛合金模锻件在交货前必须经过去除污染层的表面处理。污染层的特点是α相密集，其深度不应超过1.6 mm。确定污染层深度的最好方法是检查锻件的表面硬度。如果对锻造工艺的稳定性没有把握，应该100%地检查表面硬度（HV），证明其值不高于基体（中心部分）的硬度。锻件在经过用化学方法去除α层的处理后，还要对最薄部位的含氢量进行测定。测定含氢量的目的是为了保证即使在以后的工序中氢的含量有所增加，但总的含氢量仍不超过标准。如果含氢量过高，还应该进行真空除氢处理。

由表10.5-1、表10.5-2可以看出，锻件质量的检验除个别类别的个别项目外均具有抽检的性质，抽检合格，表示整个验收批的锻件质量合乎要求。对于有的类别的锻件规定了不检验项目，不能认为对该类锻件的这些项目不进行控制，而是由于在生产中都采取了相应的质量保证措施，如原材料复验制度、锻造工艺定型定制度、定期检验制度、工艺纪律检查制度及合理组批等措施，从而在保证锻件质量的前提下简化检验工序，并保证使用要求。

总之，锻件质量检验的内容涉及的范围很广，项目也很多，在实际工作中应根据设计对产品的要求及技术标准所要求的项目进行锻件质量的检验。

2 锻件质量检验的方法

当今时代，人们对产品的使用要求更高了，相应地对制造产品的锻件也提出了更高的要求。而锻件质量问题的表现形式又多而杂，某些类型的锻件缺陷又将严重地降低锻件的性能，威胁使用的安全性、可靠性，缩短了使用寿命，这类缺陷的存在其后果是严重的。因此对锻件质量的检验也提出了更高的要求，即绝不能将带有缺陷的锻件放过去，特别是不能放过那些带有严重影响使用性能的缺陷的锻件。要做到这一点，就要在进行锻件质量的检验和控制时，除充分地沿用常规的检测方法及手段外，也要采用反映当代水平的更快速更准确的检测手段和方法，使之对锻件质量的评估、锻件缺陷性质的判断、产生原因的判断及形成机理的分析更准确，更符合实际，从而保证既不放过缺陷锻件，并能采取得当的解决措施来改进和提高锻件质量。

如前所述，锻件质量的检验分为外观质量的检验和内部质量的检验。外观质量的检验一般来讲是属于非破坏性的检验，通常用肉眼或低倍放大镜进行检查，必要时也采用无损探伤的方法。而内部质量的检验，由于其检查内容的要求，有些必须采用破坏性检验，也就是通常所谓的解剖试验，如低倍检验、断口检验、高倍组织检验、化学成分分析和力学性能测试等，有些则也可以采用无损检测的方法，而为了更准确地评价锻件质量，应将破坏性试验方法与无损检测方法互相结合起来进行使用。而为了从深层次上分析锻件质量问题，进行机理性的研究工作还要藉助于透射型或扫描型的电子显微镜、电子探针等。

通常锻件内部质量的检验方法可归结为：宏观组织检验法、微观组织检验法、力学性能检验、化学成分分析法及无损检测法。宏观组织检验就是采用目视或者低倍放大镜（一般倍数在30×以下）来观察分析锻件的低倍组织特征的一种检验。对于锻件的宏观组织检验常用的方法有低倍腐蚀法（包括热蚀法、冷蚀法及电解腐蚀法）、断口试验法和硫印法。

低倍腐蚀法用以检查结构钢、不锈钢、高温合金、铝及铝合金、镁及镁合金、铜合金、钛合金等材料锻件的裂纹、折叠、缩孔、气孔偏析、白点、疏松、非金属夹杂、偏析集聚、流线的分布形式、晶粒大小及分布等。只不过对于不同的材料显现低倍组织时采用的浸蚀剂和浸蚀的规范不同。

断口试验法用以检查结构钢、不锈钢（奥氏体型除外）的白点、层状、内裂等缺陷、检查弹簧钢锻件的石墨碳及上述各钢种的过热、过烧等，对于铝、镁、铜等合金用来检查其晶粒是否细致均匀，是否有氧化膜、氧化物夹杂等缺陷。

而硫印法主要应用于某些结构钢的大型锻件，用以检查其硫的分布是否均匀及硫含量的多少。

除结构钢、不锈钢锻件用于低倍检查的试片不进行最终热处理外，其余材料的锻件一般都经过最终热处理后才进行低倍检验。

断口试样一般都进行规定的热处理。

微观组织检验法则是利用光学显微镜来检查各种材料牌号锻件的显微组织。检查的项目一般有本质晶粒度，或者是在规定温度下的晶粒度，即实际晶粒度，非金属夹杂物，显微组织如脱碳层、共晶碳化物不均匀度、过热和过烧组织及其他要求的显微组织等。

力学性能和工艺性能的检验则是对已经过规定的最终热处理的锻件和试片加工成规定试样后利用拉力试验机、冲击试验机、持久试验机、疲劳试验机、硬度计等仪器来进行力学性能及工艺性能数值的测定。

化学成分的测试一般是采用化学分析法或光谱分析法对锻件的成分进行分析测试，随着科学技术的发展，无论是化学分析手段还是光谱分析手段都有了进步。对于光谱分析法而言，现在已不单纯采用看谱法和摄谱法来进行成分分析，新出现的光电光谱仪不仅分析速度快，而且准确性也大大地提高了，而等离子光电光谱仪的出现更大大地提高了分析精度，其分析精度可达10^{-6}级，这对于分析高温合金锻件中的微量有害杂质如Pb、As、Sn、Sb、Bi等是非常行之有效的方法。

以上所说的方法，无论是宏观组织检验法，还是微观组织检验法或性能及成分测定法，均属于破坏性的试验方法，对于某些重要的、大型的锻件，破坏性的方法已不能完全适应质量检验的要求，这一方面是因为太不经济，另一方面主要是为了避免破坏性检查的片面性。无损检测技术的发展为锻件质量检验提供了更先进更完善的手段。

对于锻件的质量检验所采用的无损检测方法一般有：射线检验法、磁力检验法、渗透检验法、涡流检验法、超声波检验法等。

磁粉检验法广泛地用于检查铁磁性金属或合金锻件的表面或近表面的缺陷，如裂纹、白点、非金属夹杂、分层、折叠、碳化物或铁素体带等。

该方法仅适用于铁磁性材料锻件的检验，奥氏体钢制成的锻件不适于采用该方法。

渗透检验法除能检查磁性材料锻件外，还能检查非铁磁性材料锻件的表面缺陷，如裂纹、疏松、折叠等，一般只用

于检查非铁磁性材料锻件的表面缺陷，不能发现隐藏在表面以下的缺陷。

涡流检验法用以检查导电材料的表面或近表面的缺陷。

超声波检验法用以检查锻件内部缺陷如缩孔、白点、心部裂纹、夹渣等，该方法虽然操作方便、快且经济，但对缺陷的性质难以准确地进行判定。

随着无损检测技术的发展，现在又出现了诸如声振法、声发射法、激光全息照相法、CT 法等新的无损检测方法，这些新方法的出现及在锻件检验中的应用，必将使锻件质量检验的水平得以大大地提高。

值得提出的是锻件质量检验结果的准确性，虽然有赖于正确的试验方法和测试技术，但也有赖于正确的分析和判断。只有正确的试验方法，而没有准确的分析判断，也不会得出恰当的结论。因此，锻件质量的分析实际上是各种测试方法的综合应用及各个测试结果的综合分析，对于大型复杂锻件所出现的质量问题不能单纯地依赖于某一种方法，从这一点上可以说各种试验方法在分析过程中是相辅相成的，各种试验方法的有机配合，并对各自试验结果进行综合分析，才能得出正确的结论。同时就锻件质量分析的目的而言，除了正确的检验外，还应进行必要的工艺试验从而找出产生质量问题的真正原因并提出圆满的改进措施及防止对策。

当然，在实际工作中究竟选用哪些检测方法，运用何种检测手段应根据锻件的类别和规定的检测项目来进行。在选择试验方法和测试手段时，既要考虑到先进性，又要考虑到实用性、经济性，不能单纯地追求先进性。能用一种手段解决问题就不要用二种或更多种，测试手段的选择应以准确地判定缺陷的性质和确切找出缺陷产生的原因为出发点。

还应指出，对于检验而言，无论那种检验或试验都有相应规定的标准试验方法，我们必须依据规定的试验方法进行试验或检验。表 10.5-3 给出了部分试验方法标准。

表 10.5-3　部分试验方法标准

检验项目	方法标准代号	检验项目	方法标准代号
化学成分	GB/T 223	显微组织	GB/T 13298
拉力试验	GB/T 228		GB/T 13299
冲击试验	GB/T 229	钢的硫印	GB/T 4236
高温持久	GB/T 6395	晶间腐蚀	GB/T 1223
高温拉伸	GB/T 3652	冷弯试验	GB/T 232
高温蠕变	GB/T 2039	高温合金低倍、高倍	GB/T 14999
旋转弯曲疲劳	GB/T 2107	铝及铝合金显微组织	GB/T 3246
布氏硬度	GB/T 231	铝及铝合金低倍组织	GB/T 3247
洛氏硬度	GB/T 230	镁及镁合金显微组织	GB/T 4296
低倍组织	GB/T 226	镁及镁合金低倍组织	GB/T 4297
断口试验	GB/T 1814	两相钛合金高低倍	GB/T 5168
晶　粒　度	GB/T 6394	锻制圆饼超声波检验	GB/T 1786
脱　碳　层	GB/T 224	钢锻件超声波检验	GB/T 6402
非金属夹杂	GB/T 10561		

3　探查锻件内部裂纹的两种无损检测方法

3.1　射线探伤法

无论 X 射线管或 γ 射线源都能发出足以穿透厚断面的高能电磁波辐射线，用特殊的照相胶片、荧光屏或对射线敏感的仪器可以记录和射线管或射线源相对一侧的射线强度差和强度变化。由于射线通过裂纹部位和无裂纹部位所产生的强度差和强度变化是不同的，因而材料内部的裂纹就可以在胶片或荧光屏上的成像中显示出来，而解释这些成像的工作则需依靠人的视觉来进行。

影响人们发现裂纹能力的因素有以下几个：

1）合金的成分和分布。

2）工件的厚度和形状。

3）裂纹的位置、大小、形状和方向。

4）辐射的型式，强度、能量和方向。

5）显示成像物质的种类和灵敏度。

6）观察条件。

使用射线探伤法探查有内部裂纹的工件，不受尺寸大小的限制，不受材料种类的限制，也不受制造工艺不同的限制。但是锻件内部的缺陷大多在变形过程中被压成平面形状，故采用射线探伤法就不像铸件或焊接件中通常呈立体形状的缺陷那样容易被发现，因此，对于探查锻件的内部裂纹来说，射线探伤法已日渐让位于超声波探伤法，后者的灵敏度比较高。

射线探伤法的成功与否和正确地观察它的成像有密切的关系。通常还要在对问题的各个方面进行分析以后才能正确地评价射线探伤法的结果。以下是为了正确评价结果所必需考虑的几个方面：

1）锻件生产过程。

2）采用的是何种射线探伤方法。

3）一般的裂纹成像形状。

4）在被探测的锻件中可能存在的裂纹形式和大小。

5）裂纹和锻件使用性能之间的关系。

为了对上述几个方面进行分析，有时还需要通过破坏性试验获得大量材料，方能防止不必要地拒收数量过多的锻件。另一方面，通过射线探伤法没有发现有缺陷存在并不一定意味着该锻件内确无缺陷存在，还必须考虑到射线探伤法的局限性。

3.2　超声波探伤法

将高频率的声波束射入被检物体的内部，当此波束在传播过程中碰到和被检物体介质（称为第一介质）不同的介质（称为第二介质）时，由于两种介质的密度和声阻抗不同，部分能量将反射回到第一介质中，将此反射的波束用仪器反映出来或记录下来，加以分析，便能确定有无裂纹存在，如果有的话，还能进一步确定裂纹的位置并估计出它的大小或严重程度。这便是超声波探伤的基本原理。

反射的程度主要取决于界面上相对两侧物质的物理状态，而和物质的物理性能没有多大的关系。例如，声波碰到金属－气体界面时，几乎能全部反射，但当它碰到金属－液体或金属－固体界面时，只能部分地反射。

锻件中的许多缺陷像裂纹、分层、缩孔、断裂、白点、微孔和其他一些不连续缺陷都属于金属－气体界面性质，因此就很容易用超声波探伤法探查出来。夹杂物和其他金属内部的不均匀性缺陷即使并非属于金属－气体界面，也可以通



过部分反射以及超声波的其他可发现的特点显示出来。

大多数探查裂纹的超声波仪器都是靠测定下列三种物理参量中的一种或数种进行工作的：①由界面或金属内部缺陷反射回来的声波能量；②声波从发射探头回到接收探头所需要的时间；③声波束在被检物体内部由于吸收和散射而造成的衰减。

超声波探伤法除了可以探查锻件内部的缺陷外，还有以下两种用途：

1）测量两平行表面之间的距离（即厚度），其精度比用机械方法高。

2）估计材料的性能和内部组织。

超声波探伤法可以在平面上进行，也可以在曲面上进行。或者当两个表面中只有一个表面能接近，而需要探查的区域却远离此表面时，仍可使用超声波探伤法。

超声波探伤法基本上为一比较性的试验方法，它要求有一个适当的参考标准，以资比较。此标准并非固定，乃依探伤的对象和采用的方法而异。目前广泛使用的是用和被探查材料相同的材料制成的标准参考试块，其上钻有大小不同、深度不同的平底孔。另外一种方法是使用内部有自然裂纹或模拟裂纹的锻件作参考的标准，这种标准的样式当然也和具体锻件一样变化无穷。不管采用什么样式的标准，比较结果的准确性依赖标准试块或锻件的声学特性和被测锻件相同的程度。

为了使超声波探伤法的可靠性永远保持在已经达到的水平上，必须严格遵守操作规范，保管好设备的技术性能文件，并且定期检查设备的实际状态是否和文件规定的要求相符，还应该经常进行标定和做性能试验。超声波探头的选择是影响检测结果的极重要因素，因此，探头在使用前和使用过程中都必须进行临时的和定期的全面彻底检查。超声波探伤人员的技术水平应通过不断的和有计划的培训经常保持在可以信任的水平上。操作人员在进行实际操作前，还必须彻底熟悉操作过程。

3.3　射线探伤法和超声波探伤法比较

表 10.5-4 比较了射线探伤法和超声波探伤法，表中的符号只表示相对合适的程度，并非绝对的。

表 10.5-4　射线探伤法和超声波探伤法比较

探伤方法			射线探伤（直接照相法）	超声波探伤
原理	工作原理		穿透	脉冲反射
	能量传递		电磁波	弹性机械波
	缺陷部位的表现形式		完好部位和缺陷部位的穿透剂量不同，不同的程度和这两部分的材质、射线通过的方向以及缺陷的大小有关	在完好部位无反射波，在缺陷部位有反射波。其反射程度与完好部位和缺陷部位的材质有关
	显示信息的器材		胶片	示波器
	显示内容		完好部位和缺陷部位的底片黑度不同	缺陷部位出现反射波
	容易发现的缺陷方向		和射线平行的方向	和超声波垂直的方向
	容易发现的缺陷形状		在射线方向上有一定深度的缺陷（立体形缺陷）	和超声波方向垂直扩展的缺陷（平面形缺陷）
被探查的对象	锻件	铁素体钢	△	◎
		奥氏体钢和有色金属	△	○
	厚板（≥16 mm）	钢板	×	◎
		有色金属板	×	◎
	薄板（6 mm）	钢板	×	◎
		有色金属板	×	◎
	管材	钢管	×	◎
		有色金属管	×	◎
	棒材和型材	钢棒和型钢	×	◎
		有色金属棒材	×	◎
缺陷	分层裂纹		×	◎
	气孔		◎	△
	锻焊未溶合		未见使用	◎
	裂纹		△	△



续表 10.5-4

探伤方法			射线探伤（直接照相法）	超声波探伤
缺陷	夹渣		◎	○
材质	判别材质		未见使用	△
	晶粒大小		未见使用	○
	热处理状态		×	○
检测特征	判别缺陷种类		◎	△
	判别缺陷形状		◎	△
	判别缺陷尺寸		○	△
	判别缺陷的深度位置		△	◎
	记录探伤结果		◎	△
	检查人员无须在现场		◎	△
	能从单面探伤		×	◎
	探测物厚度	上限	○	◎
		下限	◎	△
	装置轻便程度		×	◎
	探测速度		×	◎
	消耗品费用		×	◎
	总费用		×	◎
	安全性		△	◎

注：◎—很合适，常用；○—合适；△—在一定条件下合适；×—不合适。

4　探查锻件表面缺陷的三种无损检测方法

4.1　磁粉探伤法

磁粉探伤法只能用于铁磁性材料，对于磁导率高的合金材料特别有效。在使用本法时，选择检查的时机非常重要。所谓时机，便是指生产过程中的某一环节。在锻件生产过程中，磁粉探伤应在喷丸工序之前和热处理之后进行，这是因为喷丸工序可能掩盖锻件的表面裂纹，而热处理则容易导致裂纹产生。

在进行磁粉探伤之前，必须对不同的工件通过试验的方法确定得到可靠结果的工艺参数。例如对于不太重要的工件，若采用周向磁化法，可以一开始用 $I=(25\sim30)D$ 的公式来估计电流值；若采用纵向磁化法，则可按 $IN=45\,000\frac{D}{L}$ 的公式来估计电流值。以上两式中，I 为电流（A），N 为线圈的匝数，D 为工件的直径或厚度（cm），L 为工件的长度（cm）。当然在通过试验确定参数的过程中，还必须仔细考虑锻件的形状和使用的方法（剩磁法或连续法）。如果被检查的是一个关键零件或锻件，那么上述公式便不能作为唯一的根据了。

一旦适当的参数已被确定，那么检查过程便应始终处于充分的控制之下。控制的内容包括：定期校准设备，保持载体溶液中的磁粉具有足够的浓度，探伤前对锻件进行准备工作的均匀一致性。要注意锻件探伤后的要求，例如去除剩磁的要求。同时最最重要的是要经常考核有关工作人员，使他们的技术永远保持在较高的水准上。

4.2　液体渗透探伤法

液体渗透探伤法是目视检查的一个辅助手段，主要用于发现暴露在工件表面上的裂纹或似裂纹的不连续性缺陷。这种方法比较简单，可以用于黑色金属材料，亦可用于有色金属材料，可用于单件生产，也可用于大批量生产。浸涂渗透液、除去过剩的渗透液以及浸涂显示剂等的工作都可以实现自动化，但是，观察锻件和解释渗透现象及判断有无缺陷或缺陷的严重程度等却只能依靠人。

市场上已经有许多现成的渗透能力和灵敏度各不相同的渗透剂出售。问题在于选择最适合某一具体用途的牌号。如果选择的渗透剂灵敏度太高，就将花费过多的时间去观察分析渗透结果，另一方面，如果选择的渗透剂灵敏度太低，就有可能漏掉应该发现的裂纹。

根据所使用的渗透剂不同，渗透检查的方式也有三种：水洗式、后乳化式和溶剂去除式。水洗式渗透剂的经济性比较好，而且有各种灵敏度不同的牌号，因而适用于绝大多数需要进行液体渗透探伤的锻件。水洗式还具有速度快和易于操作的优点。后乳化式渗透剂能够发现较浅的不连续性缺陷（如凹痕、划痕或印记等），这些缺陷用水洗法是不容易觉察的。当然，并非任何时候都需要去发现它们，特别是在这些缺陷对锻件的质量没有明显影响的时候。溶剂去除式除了在现场检查这样一些特殊情况下使用外，用途并不广。

渗透探伤的质量同遵守操作规程的严格程度和被检件在探伤前的清理工作的彻底程度有着密切的关系。因为探伤过程和带着染色剂进入裂纹的载体有关，所以和裂纹是否清洁以及裂纹暴露的程度有着极端重要的关系。锻造时使用润滑剂就使裂纹表面遭到污染，从而妨碍渗透剂的渗入。对于像铝合金和镁合金那样软的金属材料，锻造和冲切的时候也可能将裂纹封闭住。所以规范要求经过冲切和喷丸以后的锻件在检验以前必须先进行酸洗，以便除去堵住裂纹的那层金属。酸洗以后还要求进行中和冲洗，将残存在裂纹中的酸液清除干净，否则，残存的酸液和渗透液发生反应，也有可能



使裂纹漏检。

必须严格遵守渗透探伤规范，才能确保满意的检查结果。在渗透液中停留时间过短，渗透液就来不及渗入比较严密的裂纹；但如冲洗或去除残存渗透液的时间过长，就会让渗透液从裂纹中漏掉，这两种错误的操作，都有可能使裂纹漏检。

4.3　涡流探伤法

涡流探伤仪器的工作原理是测量探测线圈中的电感变化。在被检件中没有异常情况时，探测线圈和被检件之间保持着平衡的状态，因而涡流探伤仪器中存在着一个稳定的电路。当试件里发生突如其来的变化（如电导性、磁导率或尺寸变化等）时，作为反映电阻和电抗联合效应的参数 - 电感也将发生变化，这个变化可以在仪表或阴极射线管上反映出来。

金属材料中的裂纹和缺陷也可以使涡流的形状发生变化，而这种变化又使输出的读数发生变化。涡流探伤虽然也是探查表面缺陷的一种方法，但是它有以下一些特点：

1）和磁粉探伤法相比，涡流探伤法不受工件尺寸大的限制。

2）和液体渗透探伤法相比，涡流探伤法不受工件表面已经有涂覆层的限制。

3）由于涡流探伤是一种非接触型式的探伤，它的输出是电信号，可以实现自动化，速度快，效率高。

涡流穿透的深度主要和频率有关：频率愈低，穿透的深度愈大；反之，频率愈高，穿透的深度愈小。但是，当频率降低时，灵敏度也将降低。

4.4　磁粉探伤法、液体渗透探伤法和涡流探伤法的比较

表 10.5-5 比较了这三种探伤方法。

表 10.5-5　磁粉探伤法、液体渗透探伤法和涡流探伤法比较

探伤方法		磁粉探伤	液体渗透探伤	涡流探伤
工作原理		磁吸引	渗透	电磁感应
能探查的缺陷及其所在部位		表面和靠近表面的缺陷	表面上的开口缺陷	表面上和表层内的缺陷
缺陷表现形式		在缺陷部位有漏磁场，吸引磁粉附着	渗透液渗入缺陷中	涡流变化使探测线圈的输出（电压和相位）发生变化
显示信息的器材		磁粉	渗透剂和显像剂	笔式记录仪、电压表和示波器
适用材料		强磁性材料	金属或非金属材料	导电材料
锻件	铁素体钢	◎	◎	△
	奥氏体钢和有色金属	×	◎	△
厚板（>6 mm）	钢板	◎	◎	△
	有色金属板	×	◎	○
薄板（<6 mm）	钢板	◎	◎	△
	有色金属板	×	◎	△
管材	钢管	◎	◎	◎
	有色金属管	×	◎	◎
棒材和型钢	钢棒和型钢	◎	◎	△
	有色金属棒材	×	◎	○
裂纹		◎	◎	◎
折迭		○	○	○
白点		◎	◎	不作
疏松		○	◎	不作
针孔		△	◎	△
线状缺陷（棒钢）		◎	○	○
判别缺陷种类		○	○	△
记录探伤结果		○	○	◎
装置的小型轻便程度		○	◎	△
检测速度		○	△	◎
设备费用		—	—	—
消耗品费用		○	○	◎

注：◎—很合适，常用；○—合适；△—在一定条件下合适；×—不合适。

编写：杜忠权（南昌航空工业大学）
徐文臣（哈尔滨工业大学）



第 6 章　锻件生产过程的质量控制

锻件生产过程中，如果工艺控制不当常常会产生一系列的质量问题，包括由原材料缺陷引起的质量问题，加热工艺不当引起的质量问题，锻造工艺不当引起的质量问题，以及由锻后冷却、热处理和清理不当引起的质量问题等。因此，要控制好锻件的质量必须从生产准备工作就开始，要根据现实的生产条件制定一个正确的、完善的工艺规程和严格的质量控制措施，图 10.6-1 是锻件生产过程的流程图。下面分别介绍锻件各生产阶段的质量控制问题。

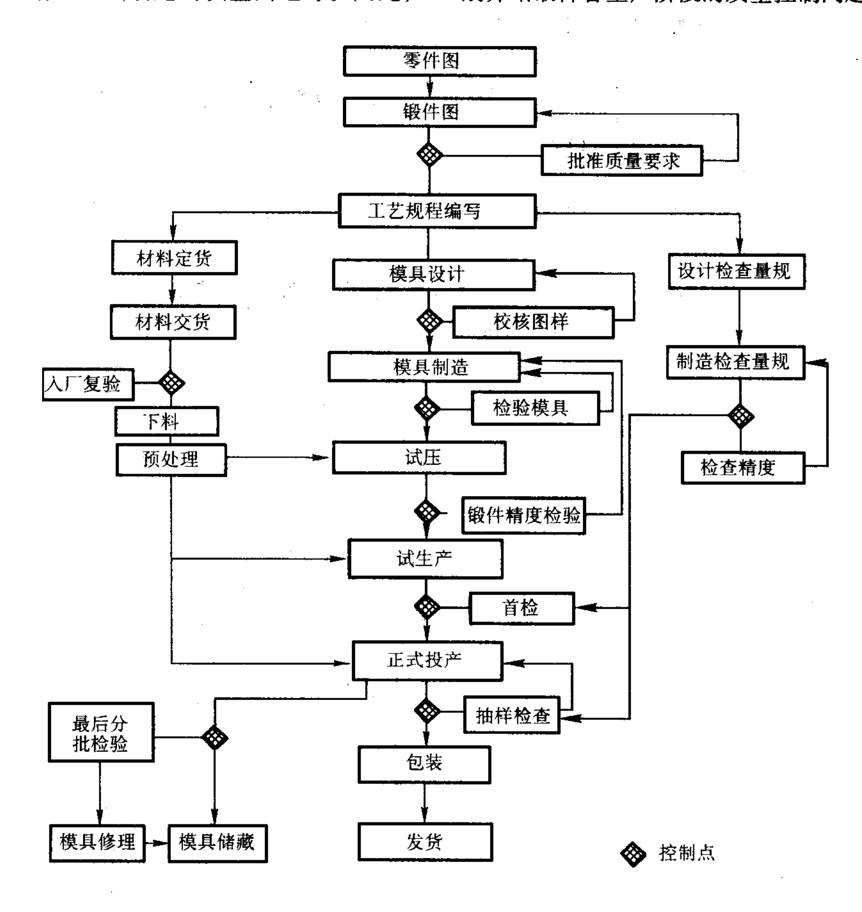


图 10.6-1　锻件生产过程流程图

1　锻件生产准备阶段的质量控制

锻件的质量必须从锻件生产准备阶段开始进行控制，在此阶段中，需要进行的工作有：

1）设计锻件图；

2）制定锻造工艺规程；

3）设计锻造用的工艺装备和模具；

4）制造锻造用的工艺装备和模具。

上述四项工作中的每一项，都有质量控制问题，以下分别予以介绍。

1.1　锻件图的质量控制

（1）设计锻件图的依据

锻件图是生产和检验锻件的主要依据，设计锻件图是整个锻件生产过程的第一步，控制锻件质量，必须从控制锻件图的质量开始。

设计锻件图的依据是：

1）产品零件图；

2）有关的锻造技术标准和质量控制文件；

3）对机械加工有特殊要求的锻件，由负责制定机械加工工艺的部门提出的机械加工余量、加工基准面以及为了便于加工而设置特殊敷料的要求；

4）锻造车间现有的设备和生产能力；

5）关于机械制图的国家标准和企业内部的通用标准。

零件图是设计锻件图的最重要依据，设计人员在设计锻件图之前，必须清楚地了解零件图形的每一细节。零件所用的材料，零件的技术要求以及单台产品上零件的数量常常是影响将要采取的锻造工艺和热处理过程的因素，所以必须认真阅读和领会。

锻造技术标准和质量控制文件是指有关的国家标准（GB）和各个工业部部颁标准，例如机械工业部部颁标准（JB）、航空工业部部颁标准（HB）和冶金工业部部颁标准（YB）。

有些零件由于某些部位的尺寸精度或粗糙度要求较高，必须经过较多的机械加工工序方能达到；又有些锻件由于形状特殊和批量生产的需要，必须在利用专门的夹具装卡固定情况下方能进行机械加工，此时，负责制定机械加工工艺规程的部门，必须同时提出增加余量和敷料的部位和量的要求。锻造工厂现有的设备类型和生产能力常常是决定锻件质量和生产经济性的重要因素。设备的生产能力不仅牵涉到设

备选用和模具等，还关系到生产任务安排、工人的技术熟练程度等。所以，一张设计良好的锻件图必须是统筹考虑了技术的、生产的和经济的各方面因素以后的产品。锻件图的绘制，应该符合现行的国家制图标准。

(2) 锻件图的基本内容

锻件图的标题栏中，应该标明产品型号、零件图号及名称、单台产品的零件数量和左右件、锻件图号及名称、材料牌号、连锻件数（如果采用多件连锻的话）、单台产品的锻件数量、锻件的热处理方法和硬度、图样比例、版次和分发单位等。

锻件图还应标明经过合理选择的分模面位置、如果有要求的话，还应表示出流线的方向。

按照有关标准的规定，结合零件图和提出的特殊加工要求来确定余量、公差、敷料、构造要素和机械加工基准面的位置。然后，在锻件图内用双点划线标出零件的轮廓形状和在括号内注明最终的名义尺寸。

锻件图上应有该锻件所属类别的标记。

锻件图上还应该根据锻件的类别标明需要进行的物理和化学性能试验项目、取样部位和取样方向。

锻件图上应该标明打硬度、炉号和检验印记的位置。

在锻件图的技术条件栏内应注明未注模锻斜度、未注明的圆角半径、垂直方向和水平方向的未注明尺寸公差，沿分模面上的错移量、残余飞刺和允许的翘曲量等。

(3) 锻件图的审批和修改手续

一般的工厂企业都规定锻件图上必须有下述人员的签名，方能生效：设计者；校对者；审核者；批准者；机械加工部门的代表；锻造及其质量控制部门的代表。

随着生产实践经验的不断积累和技术的不断进步，难免出现锻件图的修改。但是，更改锻件图和更改其他图样一样，是件十分严肃的事，必须要有依据。凡是修改图形、不加工尺寸及其公差和流线分布时，都必须根据零件设计更改的文件。其次，更改锻件图要经过一定的审批程序。凡是涉及重要锻件的原材料供应条件、主要工艺和足以影响锻件冶金质量的更改，还必须经过试验，必要时还要重新经过试车考验。

1.2 锻造工艺规程的质量控制

(1) 制定锻造工艺规程的依据

正确的锻造工艺规程，是保证获得符合质量要求的锻件的前提。制订锻造工艺规程的依据有：

1) 锻件图和有关锻件及材料的技术条件和供应状态。

2) 有关加热、锻造、热处理和清理等工序的技术规范和通用工艺规程。

3) 现有设备、工装和模具的类型、能力和精度等的技术资料。

4) 有关的检验制度和检验装置。

5) 经过鉴定并证明行之有效的工人操作经验和合理化建议。

(2) 锻造工艺规程的内容

正确的锻造工艺规程，至少应包括以下内容：

1) 产品型号、零件图号及其名称、零件的单台产品件数和左右件、锻件图号及其名称、锻件的单台产品件数、锻件重量、材料的牌号和规格、下料长度以及材料的消耗定额等。如果采用多件连锻工艺的话，还要注明连锻件数。

2) 下料工序中应说明所使用的下料设备及其型号和规格，下料工艺（例如是否需要加热和加热到多高的温度）和下料的技术要求。下料的技术要求中有切断面的粗糙度、椭圆度和不垂直度（相对于纵轴）以及下料的尺寸公差或重量公差等，如果需要进行超声波探伤应予注明。

3) 加热工序中应规定加热炉的类型和规格、装炉数量和坯料在炉底上放置的方式以及加热温度、速度和时间等的数据。

4) 锻造工序中除了规定所使用的设备类型和能力以外，还应说明坯料放入模槽的位置和坯料纤维相对于模槽的正确方向，锤击的轻重和次序以及润滑和冷却模槽的要求等。有些难以用文字叙述清楚的内容，还应考虑用简图加以说明。

5) 切边工序中除了规定切边设备的吨位要求以外，还应规定锻件是在热状态下切边还是在室温（冷）状态下切边。如果是前者，还要指出切边温度的上下限。有一些小量生产的大、中型模锻件，常常采用气割方法去除飞边，此时应提出气割时和气割以后关于清理的要求。

6) 清理工序中应注明清理方法。如果采用喷丸清理，要规定喷丸的材料和粒度；如果采用酸洗清理，要根据不同的锻件材料规定酸洗液的成分、浓度和温度等的参数。一般清理工序的最后，还要打磨毛刺和表面缺陷，那么也要规定打磨的要求。

7) 注明应进行检查的尺寸和使用的量具和检具、硬度值、按锻件类别规定的物理和化学试验项目及其他检验项目。同时，还要规定检查的制度，是全数检查还是抽样检查，如果是后者，还要给出抽检方案。

有许多工厂对Ⅰ、Ⅱ类锻件制定了专门的检验规程，因此锻造工艺规程中的大部分有关检验制度的内容，应该纳入检验规程中。

8) 必须注明各工序使用的设备型号和规格，以及使用的工艺装备的编号。

9) 有些工厂对锻造各工序制定了各种不同情况下采用的通用工艺规程，以节省制定每种锻件锻造工艺规程的工作量，对此，在工艺规程中也应该注明适用的通用工艺规程编号。

(3) 锻造工艺规程的编写审批和更改

锻造工艺规程必须按规定的格式填写，内容除正确以外，还要求完整、清晰和协调。检验工序的安排应该适当。所谓适当，是指检验工作量既不过多，也不过少，检验点的布置以满足质量控制的要求为限，一定要克服检验工作和检验点愈多愈好的思想。总之，要以最低的代价达到保证锻件质量的目标。

锻造工艺规程上应该签名的人员基本上和锻件图相同，不过不需要锻件机械加工部门代表的签名。

锻造工艺规程的更改手续基本上和审批手续相同。

1.3 锻造工装模具图的质量控制

(1) 设计锻造工装模具图的依据

锻造工装模具和锻造工艺规程一样都是为生产出符合质量要求的锻件服务的。设计锻造模具的主要依据有：

1) 锻件图。

2) 锻造工艺规程或工装模具设计任务书，后者是因为许多锻造工厂都实行由制定锻造工艺规程的部门提出锻造工装模具设计任务书，由独立的工装模具设计部门负责完成的制度。

3) 有关锻造设备的工艺参数。

4) 由各种来源（国家的，行业的和企业内部的）提出并颁布的锻造模具设计标准资料。熟练地运用这些资料，常常是高效率和高质量地完成设计任务的捷径。

5) 企业内部的锻造模具制造和验收的通用技术条件。

6) 国家的制图标准和工厂关于绘制锻造模具图纸的通用习惯表示方法。

还应指出，为了对锻造模具进行科学管理，从而保证锻

件的质量起见，在锻造模具图样上都应按 HB/T 35—1973“工艺装备编号制度”的规定标明该模具的编号。

(2) 锻造工装模具图纸的基本内容

许多锻造工厂都制定了本厂内部通用的如模块、导柱、镶块、楔键、锁扣和模槽、飞边槽等锻模通用构件或通用结构要素的标准，而且由锻模制造与验收通用技术条件来规定它们的制造质量和装配成一套模具后的质量要求。所以在模具的设计图纸中，应标明采用的标准件号和适用的标准号。此外，还应特别注明质量要求按照通用技术条件的规定。

(3) 锻造工装模具设计图的审批和更改手续

锻造工装模具设计图必须由下列人员签名后，方能生效：设计者；校对者；审核者；批准者；5）制定锻造工艺规程部门的代表；6）模具制造部门的代表；7）质量控制部门的代表。

1.4 锻模制造的质量控制

切实有效地控制锻模制造质量是最终保证锻件达到质量要求的重要因素。通常，锻模制造质量是由锻模制造工艺规程来保证的。制定锻模制造工艺规程的依据是模具设计图和有关锻模制造的各项质量标准和技术文件。除此以外，工艺规程的制定人还必须熟悉工厂内和模具车间内现有的模具制造机床的类型、性能参数和目前的精度水平。操作工人，特别是修模钳工技术的水平也是个重要因素，因为无论用传统的普通铣床或靠模铣床，还是用新式的电脉冲机床或数控机床加工出来的模槽，最后都要靠修模钳工用压缩空气（或电力）驱动的手持异型砂轮来完成最后一道修正抛磨工序的。还应指出，样板是钳工修正模槽的必备工具，正确地设计和制造样板是保证锻模质量非常重要的一环，这里包括正确选择使用样板的模槽截面位置。一般，样板的尺寸精度应比模槽的尺寸精度高得多，前者的公差仅为后者的五分之一。样板还应具有较高的硬度和工作表面粗糙度。

模具制造完毕后，对于形状简单的锻模，可以用测量模槽的各部分尺寸的方法来检验，为此，要设计一系列的专用检具，对于形状复杂的锻模，一般要用灌铅或压蜡的方法先得到样品，然后检查样品的尺寸精度是否符合锻件图的要求。检查合格后，才能开出初检合格证。模具的最终制造质量只有在实际生产条件下，用它锻出几个锻件，对这些锻件进行检查以后才能判定。终检合格证也只有在这样的情况下才能发给。

2 锻造原材料的质量控制

锻造用的原材料为铸锭、轧材、挤材及锻坯。而轧材、挤材及锻坯分别是铸锭经轧制、挤压及锻造加工成的半成品。一般情况下，铸锭的内部缺陷或表面缺陷的出现有时是不可避免的。例如，内部的成分与组织偏析等。原材料存在的各种缺陷，不仅会影响锻件的成形，而且将影响锻件的最终质量。例如，在航空工业系统中，根据不完全的统计，导致航空锻件报废的诸多原因中，由于原材料固有缺陷引起的约占一半左右。因此，应重视原材料的质量控制。

2.1 原材料的主要缺陷及其引起的锻件缺陷

原材料的缺陷及其引起的锻件缺陷通常如下。

1）表面裂纹。表面裂纹多发生在轧制棒材和锻制棒材上，一般呈直线形状，和轧制或锻造的主变形方向一致。造成这种缺陷的原因很多，例如钢锭内的皮下气泡在轧制时一面沿变形方向伸长，一面暴露到表面上和向内部深处发展。又如在轧制时，坯料的表面如被划伤，冷却时将造成应力集中，从而可能沿划痕开裂等等。这种裂纹若在锻造前不去掉，锻造时便可能扩展引起锻件裂纹。

2）折叠。折叠形成的原因是当金属坯料在轧制过程中，由于轧辊上的型槽定径不正确，或因型槽磨损以后的表面产生的毛刺在轧制时被卷入，形成和材料表面成一定倾角的折缝。对钢材，折缝内有氧化铁夹杂，四周有脱碳。折叠若在锻造前不去掉，可能引起锻件折叠或开裂。

3）结疤。结疤是在轧材表面局部区域内的一层可剥落的薄膜。

由于浇铸时钢液飞溅而凝结在钢锭表面，轧制时被压成薄膜，贴附在轧材的表面，即为结疤。锻后锻件经酸洗清理，薄膜将会剥落而成为锻件表面缺陷。

4）层状断口。层状断口的特征是其断口或断面与折断了的石板、树皮很相似。

层状断口多发生在合金钢（铬镍钢、铬镍钨钢等），碳钢中也有发现。这种缺陷的产生是由于钢中存在的非金属夹杂物、枝晶偏析以及气孔疏松等缺陷，在锻、轧过程中沿轧制方向被拉长，使钢材呈片层状。如果杂质过多，锻造就有分层破裂的危险。层状断口越严重，钢的塑性、韧性越差，尤其是横向力学性能很低，所以钢材如具有明显的层片状缺陷是不合格的。

5）亮线（亮区）。亮线是在纵向断口上呈现结晶发亮的有反射能力的细条线，多数贯穿整个断口，大多数产生在轴心部分。

亮线主要是由于合金偏析造成的。轻微的亮线对力学性能影响不大，严重的亮线将明显降低材料的塑性和韧性。

6）非金属夹杂。非金属夹杂物主要是熔炼或浇铸的钢水冷却过程中由于成分之间或金属与炉气、容器之间的化学反应形成的。另外，在金属熔炼和浇铸时，由于耐火材料落入钢液中，也能形成夹杂物，这种夹杂物统称夹渣。在锻件的横断面上，非金属夹杂可以呈点状、片状、链状或团块状分布。严重的夹杂物容易引起锻件开裂或降低材料的使用性能。

7）碳化物偏析。碳化物偏析经常在含碳高的合金钢中出现。其特征是在局部区域有较多的碳化物聚集。它主要是钢中的莱氏体共晶碳化物和二次网状碳化物在开坯和轧制时未被打碎和均匀分布造成的。碳化物偏析将降低钢的锻造变形性能，易引起锻件开裂。锻件热处理淬火时容易局部过热、过烧和淬裂。制成的刃具使用时刃口易崩裂。

8）铝合金氧化膜。铝合金氧化膜一般多位于模锻件的腹板上和分模面附近。在低倍组织上呈微细的裂口，在高倍组织上呈涡纹状，在断口上的特征可分两类：其一，呈平整的片状，颜色从银灰色、浅黄色直至褐色、暗褐色；其二，呈细小密集而带闪光的点状物，（见第 2 章图 10.2-39 ~ 图 10.2-41）。

铝合金氧化膜是熔铸过程中敞露的熔体液面与大气中的水蒸气或其他金属氧化物相互作用时所形成的氧化膜在浇铸过程中被卷入液体金属的内部形成的。

锻件和模锻件中的氧化膜对纵向力学性能无明显影响，但对高度方向力学性能影响较大，它降低了高度方向的强度性能，特别是高度方向的伸长率、冲击韧度和高度方向抗腐蚀性能。

9）白点。白点的主要特征是在钢坯的纵向断口上呈圆形或椭圆形的银白色斑点，在横向断口上呈细小的裂纹（见第 1 章图 10.1-35、图 10.1-36）。白点的大小不一，长度为 1 ~ 20 mm 或更长。

白点在镍铬钢、镍铬钼钢等合金钢中常见，普通碳钢中也有发现，是隐藏在内部的缺陷。

白点是在氢和相变时的组织应力以及热应力的共同作用下产生的，当钢中含氢量较多和热压力加工后冷却（或锻后

热处理）太快时较易产生。

用带有白点的钢锻造出来的锻件，在热处理时（淬火）易发生龟裂，有时甚至成块掉下。白点降低钢的塑性和零件的强度，是应力集中点，它像尖锐的切刀一样，在交变载荷的作用下，很容易变成疲劳裂纹而导致疲劳破坏。所以锻造原材料中绝对不允许有白点。关于白点的详细介绍请见第1章第5节。

10）粗晶环。粗晶环常常是铝合金或镁合金挤压棒材上存在的缺陷。

经热处理后供应的铝、镁合金的挤压棒材，在其圆断面的外层常常有粗晶环。粗晶环的厚度，由挤压时的始端到末端是逐渐增加的。若挤压时的润滑条件良好，则在热处理后可以减小或避免粗晶环。反之，环的厚度会增加。

粗晶环的产生原因与很多因素有关。但主要因素是由于挤压过程中金属与挤压筒之间产生的摩擦和挤压筒的温度偏低引起的。

有粗晶环的坯料锻造时容易开裂，如粗晶环保留在锻件表层，则将降低零件的性能。

有粗晶环缺陷的坯料，在锻造前必需将粗晶环车去。

11）缩管残余。缩管残余一般是由于钢锭冒口部分产生的集中缩孔未切除干净，开坯和轧制时残留在钢材内部而产生的。

缩管残余附近区域一般会出现密集的夹杂物、疏松或偏析。在横向低倍中呈不规则的皱折的缝隙。锻造时或热处理时易引起锻件开裂。

2.2　锻造原材料订货时的要求

锻造工厂在向冶金工厂订购锻造原材料时，要提出材料必需满足的技术条件。技术条件的内容，既可完全套用现行的国家标准或部颁标准，也可以在这些标准以外，再补充一些为了保证锻件质量而附加的要求。对于重要航空锻件所使用的原材料，应该提出下列要求：

1）化学成分必须符合规定，组织状态必须符合要求，特别不得含有异常组织（如组织不均匀，过热组织和打磨时形成的淬火组织等）。

2）对于制造重要锻件的原材料，应要求冶金工厂执行规定的生产工艺。为此，冶金工厂生产原材料的工艺必须先经过锻造工厂的认可和批准，而且未经锻造工厂的同意，不得擅自更改经过认可和批准的生产工艺，这是因为像高温合金和钛合金等这样一些材料，冶炼或轧制工艺即使有一点微小的变化，也会给锻件的性能带来意想不到的危害。

3）在原材料生产过程中，尽可能不产生诸如划伤、鳞片、折叠和裂纹等的表面缺陷。如果有了这些缺陷，也应保证不超出可以允许的范围。对于表面上绝对不允许有缺陷存在的锻件，有时不得不把材料的表层完全车掉以后再锻造。

4）在冶炼工艺和随后轧制工艺许可的范围内，应尽可能没有夹渣、陶瓷杂质和其他诸如空穴，气孔和白点等的缺陷。

2.3　原材料入厂复验

原材料入厂复验是锻造工厂控制原材料质量的重要手段。

对于入厂原材料的质量，应该怎样控制的问题，很大程度上取决于材料的种类、将要用来制造的锻件的重要性和对冶金工厂质量管理工作的信任程度。通常，原材料愈贵重，入厂复验的项目就愈多，例如有色金属合金和高温合金的复验要求便比一般钢材要高，锻件的类别反映了锻件的重要性，Ⅰ、Ⅱ类锻件所用的原材料，当然需要做较多的复验工作。从管理的角度来看，冶金工厂的质量管理工作水平愈低，原材料入厂复验的工作量也愈大。

应该指出，原材料入厂复验的目的并非简单地重复冶金工厂已经做过的试验项目，也不是补充冶金工厂所没有做过的试验项目，而是为了剔除不符合质量要求的原材料以及评价冶金工厂生产合格产品的能力和该厂质量管理工作的水平。复验工作多数是在原材料运抵锻造工厂以后进行的，但是为了节约运输费用和时间，也可由锻造厂长期派驻冶金工厂的人员或巡回人员就地进行复验工作。

原材料入厂时，都有冶金工厂提交的质量保证单（合格证）。质量保证单的内容至少应包括：

1）材料的牌号、规格和数量。

2）材料的供应状态。

3）熔炼方法，熔炼炉号，锭节号。

4）所依据的技术标准。

5）化学成分，力学性能和金相组织的检查结果以及无损探伤结果。

6）出厂日期。

确定原材料入厂复验项目的原则是：

1）技术标准或订货协议中有特殊要求的。

2）有可能影响生产过程的顺利进行或锻件最终使用性能的。

3）由于原材料冶金工厂不同意而未被纳入订货协议，但是却和锻件的生产和使用性能有很大关系的。

4）规定新材料的复验项目时，范围从宽，要求从严。

检查原材料的手段有破坏的和非破坏的两大类，表10.6-1综合了我国一些航空锻件专业生产厂的原材料入厂复验项目，该表是按材料的类别区分的。

表10.6-1中没有包括原材料入厂时一般都做的检查项目如：

1）肉眼观察原材料表面有无外观缺陷。

2）原材料的尺寸和形状是否符合要求。

3）如果原材料是钢，还要用火花鉴别法判断是否把不同牌号的材料混到了一起。

表10.6-1中也没有包括为了检查原材料的工艺性能而要求进行的检验项目，如通过镦粗试验显示材料的镦粗性能和材料的表层中是否存在着微小的缺陷，又如为了检查红脆性，在700～900℃情况下进行的断裂试验等。

2.4　原材料的标记方法

对原材料的标记工作，必须从入厂时起便十分注意，因为它是保证锻件在生产过程中的同一性和可追踪性，以及评价冶金工厂质量管理工作水平的重要手段。

原材料入厂时，由冶金工厂提供的标记的内容至少应该包括：材料牌号、熔炼炉号、锭节号（如有要求）、批次号、冶金工厂代号。

航空锻件使用的原材料大多数是由冶金工厂供应的棒材，其中直径大于10 mm的又占绝大多数。这些材料在通过

表 10.6-1 入厂原材料复检项目表

材料 / 项目		钢					高温合金	铝合金	镁合金	铜合金	钛合金
		优质碳素结构钢	碳素结构钢	合金结构钢	不锈耐酸钢	滚珠轴承钢					
化学成分		⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
机械性能	拉伸	⊙		⊙	⊙			⊙	⊙	⊙	⊙
	冲击	○		⊙	⊙						⊙
	硬度	△		⊙	⊙	⊙			⊙		⊙
	高温拉伸						⊙				⊙
	持久强度						⊙				⊙
	热稳定性						⊙	○			
	断裂韧性			△							
金相组织	低倍组织	⊙		⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙		⊙
	显微组织			△		⊙	△				⊙
	断口检查			○		⊙	○			⊙	
	晶粒度		⊙	○			⊙				
	晶粒不均匀度						⊙				
	纯净度			○	○	⊙	⊙				
	粗晶环							○			
	塔形检查	○		○	○		△				
	超声波探伤			△	△		○	△			⊙
	表面污染										△

注：⊙——应做项目；○——常做项目；△——不常做项目。

入厂复验后，要逐根地在材料的一端距离端部 50 mm 处打上该批材料的复验编号，并在材料的全长上每隔 50 ~ 100 mm 用喷漆的方法标记上材料的牌号，但是仍应注意保留冶金工厂的熔炼炉号和锭节号（如果有的话）。对于直径小于 10 mm 的棒料，应该用不同颜色组成的色带来代替用文字表示的材料牌号标记。涂完颜色的材料组成捆后，还应在每一捆上挂上金属标签。表面质量不合格的材料，应用红色喷涂，以资识别。物理、化学性能检查不合格的原材料，应该另外存放保管。

3 备料过程中的质量控制

3.1 备料不当产生的缺陷及其对锻件的影响

备料不当产生的缺陷有以下几种。

1）切斜。切斜是在锯床或冲床上下料时，由于未将棒料压紧，致使坯料端面相对于纵轴线的倾斜量超过了规定的许可值。严重的切斜，可能在锻造过程中形成折叠。

2）坯料端部弯曲并带毛刺。在剪断机或冲床上下料时，由于剪刀片或切断模刃口之间的间隙过大或由于刃口不锐利，使坯料在被切断之前已有弯曲，结果部分金属被挤入刀片或模具的间隙中，形成端部下垂毛刺。

有毛刺的坯料，加热时易引起局部过热、过烧，锻造时易产生折叠和开裂。

3）坯料端面凹陷。在剪床上下料时，由于剪刀片之间的间隙太小，金属断面上、下裂纹不重合，产生二次剪切，结果部分端部金属被拉掉，端面成凹陷状。这样的坯料锻造时易产生折叠和开裂。

4）端部裂纹。在冷态剪切大断面高合金钢或高碳钢棒料时，常常在切断后 3 ~ 4 小时内，端部出现裂纹。其原因是刀片上单位压力太大，使圆形截面压扁成椭圆形，因而在材料内部产生很大的内应力。在应力作用下，端面常在过了一段时间后发生开裂。原材料的截面大，硬度高或分布不均匀，材料内部偏析严重都容易促使裂纹产生。因此在剪切大截面的高合金钢或高碳钢棒料时，都应预热到 300 ~ 500℃，方能避免产生裂纹。

有端部裂纹的坯料，锻造时裂纹将进一步扩展。

5）气割裂纹。未经预热的原材料在气割过程中，坯料内部存在着较大的热影响区，表现为从坯料的表面到心部，显微组织变化非常剧烈，从而出现很大的组织应力和热应力，使坯料端面上出现一般向内部延伸的纵向裂纹。高合金钢比低合金钢、高碳钢比低碳钢容易产生这种裂纹，环境温度低的时候又比环境温度高的时候容易产生。这种裂纹如不预先清除，锻造时裂纹将进一步扩展。

6）凸芯开裂。车床上下料时，坯料断面中心常留下一段直径小而高度低的残料，称为“凸芯”。凸芯如不在锻造前预先消除，在锻造过程中，凸芯部分的金属冷却快，塑性也比周围的基体部分降低得多，因此在凸芯向基体过渡的位置上，常常由于应力集中而开裂。

3.2 下料工序的质量控制

1）下料开始和结束，切忌将材料弄错或把不同牌号的材料混到了一起，这就要求工人在下料开始前必须根据工艺规程和流水卡片，核实材料是否符合规定；其次，必须严格禁止在同一时间内，在同一设备上进行两种不同材料的下料工作；最后，对于Ⅰ，Ⅱ类重要锻件，还应该在切下的坯料上标明材料的牌号、熔炼炉号和锭节号。

运输坯料的料箱必须有标记，到达锻造车间后便要分区存放。下料以后剩余的料头必须按材料的牌号、规格和炉号分开管理。

2）选择正确的下料方法。锯切的方法虽然精度高，但生产效率较低，不能适应大批量生产的要求，剪断的方法虽然生产效率较高，但容易使坯料的端面变形，气割的方法一般不得用于高合金钢和有色金属及其合金。

必须严格遵守下料的技术规程。在锯床上下料时，压紧



力要足够；剪床上下料时，必须正确调整刀片的间隙；还要根据不同的情况，原材料该预热的就要按正确的规范预热。

3）操作人员必须十分注意原材料表面和坯料端面上可能存在的宏观缺陷，如折叠、裂纹、气泡、夹杂和中心疏松等，一旦发现，应立即报告质量控制人员，听候处理。

4）实行“首件三检”制度，检查下料尺寸（或重量）是否符合规定。在无飞边的闭式模锻情况下，坯料的重量精度要求有时会比下料尺寸的精度要求更高。

对于需要进行超声波探伤的坯料，还应有去毛刺的要求。

4 加热过程中的质量控制

加热是锻造过程中非常重要的一道工序。锻坯加热质量不好，将会产生很多的锻件质量问题，因此，应重视加热质量控制。

4.1 加热工艺不当常产生的缺陷

加热不当所产生的缺陷可分为：①由于介质影响使坯料外层组织化学状态变化而引起的缺陷，如氧化、脱碳、增碳和渗硫、渗铜等。②由于内部组织结构的异常变化引起的缺陷，如过热、过烧和未热透等。③由于温度在坯料内部分布不均，引起内应力（如温度应力、组织应力）过大而产生的坯料开裂等。下面介绍其中几种常见的缺陷。

1）脱碳。脱碳是指金属在高温下表层的碳被氧化，使得表层的含碳量较内部明显降低的现象。脱碳层的深度与钢的成分、炉气的成分、温度和在此温度下的保温时间有关。采用氧化性气氛加热易发生脱碳，高碳钢易脱碳，含硅量多的钢也易脱碳。

脱碳使零件的强度和疲劳性能下降，磨损抗力减弱。关于脱碳的详细介绍见第 1 章第 4 节。

2）增碳。经油炉加热的锻件，常常在表面或部分表面发生增碳现象。有时增碳层厚度达 1.5～1.6 mm，增碳层的含碳量达 1%（质量分数）左右，局部点含碳量甚至超过 2%（质量分数），出现莱氏体组织。

这主要是在油炉加热的情况下，当坯料的位置靠近油炉喷嘴或者就在两个喷嘴交叉喷射燃油的区域内时，由于油和空气混合得不太好，因而燃烧不完全，结果在坯料的表面形成还原性的渗碳气氛，从而产生表面增碳的效果。

增碳使锻件的机械加工性能变坏，切削时易打刀。

3）过热。过热是指金属坯料的加热温度过高，或在规定的锻造与热处理温度范围内停留时间太长，或由于热效应使温升过高而引起的晶粒粗大现象。

碳钢（亚共析或过共析钢）过热之后往往出现魏氏组织。马氏体钢过热之后，往往出现晶内织构，工模具钢往往以一次碳化物角状化为特征判定过热组织。钛合金过热后，出现明显的 β 相晶界和平直细长的魏氏组织。合金钢过热后的断口会出现石状断口或萘状断口。过热组织，由于晶粒粗大，将引起力学性能降低，尤其是冲击韧度。

一般过热的结构钢经过正常热处理（正火、淬火）之后，组织可以改善，性能也随之恢复，这种过热常被称之为不稳定过热；而合金结构钢的严重过热组织经一般的正火（包括高温正火）、退火或淬火处理后，不能完全消除，这种过热常被称之为稳定过热。

关于过热的详细介绍见第 1 章第 2 节。

4）过烧。过烧是指金属坯料的加热温度过高或在高温加热区停留时间过长，炉中的氧及其他氧化性气体渗透到金属晶粒间的空隙，并与铁、硫、碳等氧化，形成了易熔的氧化物的共晶体，破坏了晶粒间的联系，使材料的塑性急剧降低。过烧严重的金属，镦粗时轻轻一击就裂，拔长时将在过烧处出现横向裂纹。

过烧与过热没有严格的温度界线。一般以晶粒出现氧化及熔化为特征来判断过烧。对碳钢来说，过烧时晶界熔化、严重氧化。工模具钢（高速钢、Cr12 型钢等）过烧时，晶界因熔化而出现鱼骨状莱氏体。铝合金过烧时出现晶界熔化三角区和复熔球等。锻件过烧后，往往无法挽救，只好报废。

5）加热裂纹。在加热截面尺寸大的大钢锭和导热性差的高合金钢和高温合金坯料时，如果低温阶段加热速度过快，则坯料因内外温差较大而产生很大的热应力。加之此时坯料由于温度低而塑性较差，若热应力的数值超过坯料的强度极限，就会产生由中心向四周呈辐射状的加热裂纹，使整个断面裂开。

6）加热温度低造成的裂纹。坯料加热温度过低，由于金属材料的塑性差，锻造时常常容易产生开裂。

7）铜脆。铜脆在锻件表面上呈龟裂状。高倍观察时，有淡黄色的铜（或铜的固溶体）沿晶界分布。

坯料加热时，如炉内残存氧化铜屑，在高温下氧化铜还原为自由铜，熔融的铜原子沿奥氏体晶界扩展，削弱了晶粒间的联系。另外，钢中含铜量较高［>2%（质量分数）］时，如在氧化性气氛中加热，在氧化铁皮下形成富铜层，也引起铜脆。

8）表面污染。镍基高温合金在燃烧含硫重油的炉子里加热时，硫沿着晶界渗透侵蚀，锻造时便发生开裂。坯料表面上的油漆或染料如含有硫，在加热前未加清除，加热时也会产生同样后果。

4.2 加热炉应保持良好的工作状态

加热炉是保证加热质量的关键设备，应保证良好的工作状态。

根据对加热炉工作区温度均匀性的要求，可将加热炉分为五类，见表 10.6-2。

表 10.6-2 锻造加热炉的类别

类别	工作区①的炉温均匀性②/°C	控温精度③/°C	仪表允许误差不大于/°C	推荐用途
Ⅰ	±3	±1.0	±1.0	
Ⅱ	±5	±1.5	±1.5	
Ⅲ	±10	±5.0	±3.0	加热铝合金、镁合金、铜合金，钛合金和高温合金
Ⅳ	±15	±8.0	±5.0	加热铜合金、钛合金、高温合金、不锈钢和合金结构钢
Ⅴ	±20	±10	±6.5	加热不锈钢和合金结构钢等

① 工作区是加热炉的工作室中符合炉温均匀性要求的空间尺寸，大规格加热炉的工作区可以分为二个以上控温区。

② 炉温均匀性是自动记录仪表指示的温度和工作室炉温均匀性检测点之间的最大温度差。

③ 控温精度是控温点的温度与其指示的最高或最低温度之差。

炉温均匀性是衡量加热炉质量的一个非常重要的指标。所以，炉温均匀性及其控温仪表的精度必须定期进行检查，见表 10.6-3。

检测炉温均匀性的方法有九点法和三点法之分，而以九点法的检测质量最高。三点法只在中、低温电炉中有用。

九点法检测炉温均匀性的原理见图 10.6-2。该图所示为只有一个控温区的箱式加热炉图 a 和井式加热炉图 b。一个控温区至少应有九支热电偶。大规格的加热炉，常常有二个以

表 10.6-3 炉温均匀性及其控温仪表的检测周期

加热炉类别	控温仪表检测周期	炉温均匀性检测周期
Ⅰ	三个月	一个月
Ⅱ	六个月	六个月
Ⅲ	六个月	六个月
Ⅳ	六个月	六个月
Ⅴ	一年	一年

注：在下列情况下，应另外增加炉温均匀性的检测次数
1）新炉投产前；
2）加热炉大修以后（加热元件更换、喷嘴更换和炉衬全部重砌）；
3）重新安装控温热电偶后；
4）工作温度超过加热炉最初检测的温度范围；
5）影响加热炉温度均匀性的因素发生变化。

上控温区，因此每增加一个控温区，便要增加五支热电偶。或者按工作区的体积计算，每 0.4 m^3 放置一支热电偶，但总数不得少于九支。工作区体积大于 16 m^3 的炉子，最多用 40 支热电偶。热电偶在炉内要均匀分布。

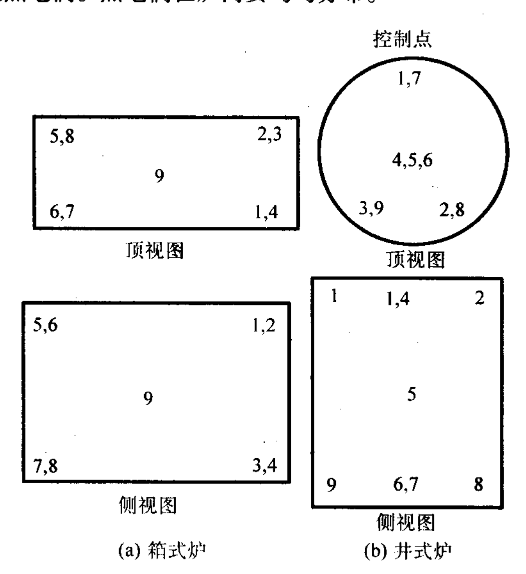


图 10.6-2 九点法检测炉温均匀性的示意图

4.3 加热工序的质量控制

加热工序质量控制的要点是：

1）必须严格执行正确的坯料管理制度。

2）选择正确的炉内气氛：加热钢料时，炉气应略带还原性；加热铝合金时，炉气中不得含硫和水蒸气；加热钛合金时，炉气应略带氧化性。

3）必须严格执行确定的加热规范。炉温必须符合工艺规程的规定。应该给每台加热炉装备自动控温系统和记录报警系统。加热时间必须符合规定。坯料的加热记录应作为技术档案保存一定的年限。

4）执行正确的加热方法。坯料应该放置在炉子的工作区内，尽可能码放整齐，行与行、列与列之间应留出一定的间隙。重要的锻件还必须将坯料架空。在设计加热炉时，燃烧咀的温度通常要比炉子的正常温度高。为了避免火焰和坯料直接接触，一般烧嘴的位置应比坯料高出 300 mm 以上。在电炉内加热时，坯料也要和电阻丝保持一定的距离。炉底应保持清洁，要经常清除氧化皮，加热过铜料的炉子用来加热钢料时，必须先进行除铜处理。

5）当加热炉由于失控等原因而出现跑温（温度骤然升高）或掉温（温度突然降低）时，应视具体情况按操作规程进行处理，并在该炉锻件上作出标记，以便对这些锻件的质量采取特别的保证措施。

5 锻造工序的质量控制

5.1 锻造工艺不当常产生的缺陷

锻造工艺不当产生的缺陷通常有以下几种。

1）大晶粒。大晶粒通常是由于始锻温度过高和变形程度不足、或终锻温度过高、或变形程度落人临界变形区引起的。铝合金变形程度过大，形成织构；高温合金变形温度过低，形成混合变形组织时也可能引起粗大晶粒。

晶粒粗大将使锻件的塑性和韧性降低，疲劳性能明显下降。

2）晶粒不均匀。晶粒不均匀是指锻件某些部位的晶粒特别粗大，某些部位却较小。产生晶粒不均匀的主要原因是坯料各处的变形不均匀使晶粒破碎程度不一，或局部区域的变形程度落人临界变形区，或高温合金局部加工硬化，或淬火加热时局部晶粒粗大。耐热钢及高温合金对晶粒不均匀特别敏感。晶粒不均匀将使锻件的持久性能、疲劳性能明显下降。

3）冷硬现象。变形时由于温度偏低或变形速度太快，以及锻后冷却过快，均可能使再结晶引起的软化跟不上变形引起的强化（硬化），从而使热锻后锻件内部仍部分保留冷变形组织。这种组织的存在提高了锻件的强度和硬度，但降低了塑性和韧性。严重的冷硬现象可能引起锻裂。

4）裂纹。裂纹通常是由于锻造时存在较大的拉应力、切应力或附加拉应力引起的。裂纹发生的部位通常是在坯料应力最大、厚度最薄的部位。如果坯料表面和内部有微裂纹、或坯料内存在组织缺陷，或热加工温度不当使材料塑性降低，或变形速度过快、变形程度过大以致超过材料允许的塑性指标等，则在镦粗、拔长、冲孔、扩孔、弯曲和挤压等工序中都可能产生裂纹。

关于裂纹的详细介绍见第 1 章第 7 节。

5）龟裂。龟裂是在锻件表面呈现较浅的龟状裂纹。在锻件成形中受拉应力的表面（例如，未充满的凸出部分或受弯曲的部分）最容易产生这种缺陷。引起龟裂的内因可能是多方面的：①原材料含 Cu、Sn 等易熔元素过多。②高温长时间加热时，钢料表面有铜析出、表面晶粒粗大、脱碳、或表面经过多次加热。③燃料含硫量过高，有硫渗入钢料表面。

6）飞边裂纹。飞边裂纹是模锻及切边时在分模面处产生的裂纹。飞边裂纹产生的原因可能是：①在模锻操作中由于重击使金属强烈流动产生穿筋现象。②镁合金模锻件切边温度过低；铜合金模锻件切边温度过高。

7）分模面裂纹。分模面裂纹是指沿锻件分模面产生的裂纹。原材料非金属夹杂多在模锻时向分模面流动与集中或缩管残余在模锻时挤入飞边后常形成分模面裂纹。

8）折叠。折叠是金属变形过程中已氧化过的表层金属汇合到一起而形成的。它可以是由两股（或多股）金属对流汇合而形成；也可以是由一股金属的急速大量流动将邻近部分的表层金属带着流动，两者汇合而形成的；也可以是由于变形金属发生弯曲、回流而形成；还可以是部分金属局部变形，被压人另一部分金属内而形成。折叠与原材料和坯料的形状、模具的设计、成形工序的安排、润滑情况及锻造的实际操作等有关。

折叠不仅减少了零件的承载面积，而且工作时由于此处的应力集中往往成为疲劳源。

关于折叠的详细介绍见第 1 章第 6 节。

9）穿流。穿流是流线分布不当的一种形式。在穿流区，



原先成一定角度分布的流线汇合在一起形成穿流，并可能使穿流区内、外的晶粒大小相差较为悬殊。穿流产生的原因与折叠相似，是由两股金属或一股金属带着另一股金属汇流而形成的，但穿流部分的金属仍是一整体。

穿流使锻件的力学性能降低，尤其当穿流带两侧晶粒相差较悬殊时，性能降低较明显。

10）锻件流线分布不顺。锻件流线分布不顺是指在锻件低倍上发生流线切断、回流、涡流等流线紊乱现象。如果模具设计不当或锻造方法选择不合理使预制毛坯的流线紊乱或工人操作不当及模具磨损而使金属产生不均匀流动，都可以使锻件流线分布不顺。流线不顺会使各种力学性能降低，因此对于重要锻件，都应有流线分布的要求。

11）铸造组织残留。铸造组织残留主要出现在用铸锭作坯料的锻件中。铸态组织主要残留在锻件的困难变形区。锻造比不够和锻造方法不当是铸造组织残留产生的主要原因。

铸造组织残留会使锻件的性能下降，尤其是冲击韧度和疲劳性能等。

12）碳化物偏析级别不符要求。碳化物偏析级别不符要求主要出现于莱氏体工模具钢中。主要是锻件中的碳化物分布不均匀，或呈大块状集中分布或呈网状分布。造成这种缺陷的主要原因是原材料碳化物偏析级别差，加之改锻时锻比不够或锻造方法不当。

具有这种缺陷的锻件，热处理淬火时容易局部过热和淬裂。制成的刃具和模具使用时易崩刃等。

13）带状组织。带状组织是铁素体和珠光体、铁素体和奥氏体、铁素体和贝氏体以及铁素体和马氏体在锻件中呈带状分布的一种组织，它们多出现在亚共析钢、奥氏体钢和半马氏体钢中。这种组织，是在两相共存的情况下锻造变形时产生的。

带状组织能降低材料的横向塑性指标，特别是冲击韧度。在锻造或零件工作时常易沿铁素体带或两相的交界处开裂。

14）局部充填不足。局部充填不足主要发生在筋肋、凸角、转角、圆角部位，从而使尺寸不符合图样要求。产生的原因可能是：①锻造温度低，金属流动性差；②设备吨位不够或锤击力不足；③制坯模设计不合理，坯料体积或截面尺寸不合格；④模膛中有氧化皮堆积。

15）欠压。欠压指垂直于分模面方向的尺寸普遍增大，产生的原因可能是：①锻造温度低。②设备吨位不足，锤击力不足或锤击次数不足。

16）错移。错移是锻件的上半部沿分模面相对于下半部产生位移。产生的原因可能是：①滑块（锤头）与导轨之间的间隙过大；②锻模设计不合理，缺少消除错移力的锁口或导柱；③模具安装不良。

17）轴线弯曲。锻件轴线弯曲，与平面的几何位置有误差。产生的原因可能是：①锻件出模时的操作不注意；②切边时受力不均；③锻件冷却时各部分降温速度不一致；④清理与热处理不当。

5.2 锻造工序的质量控制

1）应根据锻件所使用的材料、锻件的几何形状和尺寸、锻造工艺和对锻件的质量要求，合理地选择锻造设备的种类和能力。一般的模锻可以在锤或曲柄压力机上完成，但是精锻叶片等的理想设备是螺旋压力机，而等温精锻又必须在液压机上进行。设备的能力应足够，否则火次要增多或者因为锻不透而影响锻件质量，但能力过大也会造成浪费而无必要。设备的状态应良好，并应具有良好的导向精度。

2）模具应经过检验合格。模具在使用前应正确执行预热制度，润滑剂的种类应选用得当，使用合理。

3）严格执行工艺规程中确定的变形温度、变形速度、变形程度和操作规程。要十分注意逐次变形量和每火次的总变形量。而且对不同材料应根据其特点分别对待。例如：对各种钢料、铝合金和镁合金等最后一次变形量应适当大些。而对镍基高温合金和钛合金，如果逐次变形量太大，会由于变形热效应而使材料内部温度升得过高，从而导致开裂或形成过热组织。然而钛合金的高温锻造（在β相区内锻造）工艺又要求达到足够大的变形量，否则便难以获得希望得到的网篮状组织，因为这种组织具有比较高的强度，同时还有较佳的断裂韧性。

4）制定和恪守保证锻造过程质量的制度也十分重要。属于这种制度的有“首件三检”制度。所谓首件三检，便是每个班生产的第一个锻件必须通过锻造工人自己检查，班组长复查以及专职检验人员的检查以后，确认质量合格，方得正式生产。保证锻造过程质量的制度还要求质量控制人员监督工人执行工艺规程和在生产过程中随时抽查锻件的质量，即所谓“巡检”工作。

在航空产品中Ⅰ，Ⅱ类锻件是飞机及其发动机上的主要受力构件，在飞机飞行中，它们一旦损坏，将会发生不堪设想的后果。所以，这些锻件在正式投入生产前必须做到“三定”，所谓三定便是定工艺、定设备和定人员。必要时，还应该为这些锻件制定专用的工艺说明书，并且按锻件图号和件号建立质量档案。

6 锻件热处理过程的质量控制

目前，大多数钢锻件都需要在锻后进行多道机械加工工序，所以一些钢锻件在锻造车间内进行热处理的目的是最大限度地改善锻件的机械加工性能。至于通过别的热处理方法来获得该零件的最后工作性能，那是离开锻造车间以后的事了。有色金属锻件则大部分是由锻造车间来完成热处理工作的。

表10.6-4简要介绍了不同金属材料的锻件可能在锻造车间中进行的主要热处理过程。锻件热处理过程中常易发生的缺陷有两种：

表10.6-4 锻件的主要热处理过程

合金种类	锻造车间进行的热处理工作
碳钢	正火，淬火，回火
合金钢	正火，回火，恒温退火
奥氏体不锈钢	固溶退火
马氏体不锈钢	退火，淬火，回火
钛合金	退火，固熔处理，时效
铁基高温合金	固溶处理，时效
镍基高温合金	固溶处理，稳定化，时效
铝合金和镁合金	固溶处理，时效
耐火金属	退火，消除应力

1）锻件硬度过高或过低。硬度过高的原因是：①正火后冷却速度太快，②正火或回火加热时间太短；③原材料的化学成分不合格。

硬度过低的原因是：①淬火温度低或淬火加热时间短，②回火温度偏高，③多次重复加热引起表面脱碳。④原材料的化学成分不合格。

2）同一锻件上硬度分布不均。造成这种缺陷的主要原因是热处理工艺制定得不合理，例如一次装炉量过多和加热时间过短，或者由于锻件表面上的局部地区有脱碳现象等。

保证热处理质量的第一个环节是热处理炉温度的均匀性。对于大多数低合金可淬硬钢来说，奥氏体化的温度偏差能够控制在±15℃范围内便可以了，但是某些镍基合金特别在时效处理时，温度偏差应该控制在±5℃范围内。钛合金

的时效温度偏差是±8.5℃。

温度测量和记录仪表的读数精度也因锻件的材料而异，见表10.6-5。此处所谓精度，是指读数和炉子真实温度之间的差异。

表10.6-5 锻件热处理炉测量记录仪表的读数精度

锻件材料（热处理）	精度/℃
低合金可淬硬钢（奥氏体化）	±15
镍基高温合金和高强度铝合金（时效）	±5
钛合金	±3

为了达到这样精度的温度要求，通常采用所谓"试块热电偶"的方法，即用和锻件相同的材料制成40 mm×25 mm×25 mm的试块，其中埋入热电偶，然后将试块置入加热的锻件中间，以记录炉子的温度。放置试块的数量和位置和以下因素有关：

1）材料对热处理温度的敏感性。

2）锻件的尺寸和重量。

3）加热炉的结构型式。

4）加热炉的质量情况。

5）锻件截面尺寸的变化。

为了达到控制锻件热处理质量的目的必须从下述几个方面入手：

（1）加热炉

加热炉的结构应设计合理，并具有足够宽的温度范围以满足热处理周期的需要。必须经常检查炉子的工作状态，特别是用耐火材料构筑的炉壁、炉底、炉穹、炉门和喷嘴座不得出现开裂和隙缝。因为裂缝会造成漏气，使外界冷空气进入炉中，从而在炉膛的某个部位出现所谓"冷点"，靠近或位于冷点上的锻件便会达不到规定的温度，如果冷点靠近热电偶，就会使仪表反映的温度不正确。

（2）淬火槽

淬火槽的尺寸应该足够大，并能良好地搅拌以便获得快速而均匀的冷却。为了使淬火液的温度保持和控制在要求的水平上，一般最好配备热交换器。

（3）温度控制和记录电位计

所有处理重要锻件（例如航空锻件）的加热炉都必须配备这种装置。此外，还必须由专人定期检查仪表工作情况，以及记录是否符合热处理规程。

（4）检查炉子温度均匀性

这种检查工作也应定期进行，以便确定喷嘴工作是否正常，耐火材料的筑体有没有裂缝，燃料和空气的混合是否适当，以及有没有因加热元件损坏而造成的热点或冷点等。这类检查工作一般在空炉情况下进行。检查炉温均匀性工作可在正常生产条件下进行。两次检查的间隔时间应为半年到一年。

（5）硬度检查

硬度检查是控制大多数锻件热处理质量的常用手段。既可以根据硬度来判断终锻件的热处理质量，也可以在热处理过程中进行抽查，以判断是否需要调整热处理的某些工艺参数。

（6）根据材料的化学成分调整热处理制度

对某些合金钢或高温合金，成分的变化虽然很微小，但也必须对它们的回火或时效最佳温度进行调整。

（7）记录

热处理炉的记录图通常必须保存七年以上。任何情况下，都必须使该记录和锻件热处理炉批号一致。通常的做法是在锻造炉号的旁边打上一个热处理炉批号，使两者对应起来。对用热处理敏感材料制造的锻件，必须这样做。

7 锻件清理过程的质量控制

锻件常用的清理方法有化学清理和机械清理。应该根据锻件的材料特征和形状特征选择适当的清理方法。如铝合金和镁合金由于材料本身比较软，因此不宜采用滚筒喷丸清理的方法。即使材料本身没有问题，但如果锻件的形状具有高筋、薄壁或锐边，也不能用滚筒喷丸清理方法，因为那样会造成边缘钝圆、掉肉或使锻件形状不清晰。钛合金锻件一般可以采用喷丸清理，但应使用玻璃丸或不锈钢丸，避免使用铁丸，因为铁丸对钛合金有侵蚀作用。

锻件清理时产生的缺陷通常有以下几种：

（1）酸洗过度

酸洗过度可能在锻件表面上形成麻点或麻坑，麻点或麻坑会向表层内部发展，深度可达1 mm以上。造成这种缺陷的原因有：

1）没有严格遵守酸洗的工艺规程，例如酸洗液的配比不当和浓度过大，酸洗的时间过长或酸洗温度过高。

2）锻件自身的缺点，例如在锻件两端和分模面流线露头的地方，由于杂质较多，该处的电极电位和基体材料的不同，因而产生电化学腐蚀的作用。加之有些杂质本身的抗腐蚀性比较差，也容易受到电极电位酸洗液的侵蚀。

（2）腐蚀裂纹

马氏体不锈钢锻件锻后如果存在较大的残余应力，酸洗时则很容易在锻件表面产生细小网状的腐蚀裂纹。若组织粗大将加速裂纹的形成。因此，该类钢锻后应先退火，清除了残余应力后再进行酸洗。

机械清理方法将产生严重的噪声和粉尘，化学清理方法会释放出大量有毒气体，这两种方法都会对环境造成污染。因此，锻件清理间应该和锻件生产车间隔离，噪音还要采取有效方法降低，空气要不断更换，排放的化学溶液应经过处理达到排放标准，工作场地应该保持清洁明亮。

锻件表面的缺陷和毛刺应该由清理工人用打磨的方法去除。缺陷去除以后的部位，必须保证单面的最小极限尺寸。非加工表面还要求清理的宽度不得小于缺陷深度的6倍（一般钢锻件和铝合金锻件）和8倍（超高强度钢锻件）。为了避免应力集中，还要求清理表面和非清理表面的过渡处用圆弧连接。

编写：杜忠权（南昌航空工业大学）
徐文臣（哈尔滨工业大学）

参 考 文 献

1 吕炎主编．锻件缺陷分析与对策．北京：机械工业出版社，1999
2 吕炎等编著．锻压成形理论与工艺．北京：机械工业出版社，1991
3 中国机械工程学会锻压学会编．锻压手册．第二版：第2卷。北京：机械工业出版社，2001
4 中国机械工程学会锻压学会编．锻压手册：第2卷，冲压．北京：机械工业出版社，1993
5 吕炎主编．锻造工艺学．北京：机械工业出版社，1995
6 吕炎等．Stress Distribution Regularity along the Loading Direction in Locally Loading．第三届国际塑性加工学术会议．1990
7 裴兴华等．摆动辗压．北京：机械工业出版社，1991
8 周德成等．摆动辗压成形过程中产生的缺陷及防止方法．热加工工艺，1992（1）
9 胡正寰等．楔横轧理论与应用．北京：冶金工业出版社，1996
10 梁炳文等．板料成形性能．北京：机械工业出版社，1999
11 旁钧等．大型铸锻件缺陷分析图谱．北京：机械工业出版社，1990
12 郭会光，杨明鼎等．大型汽轮机转子锻压技术的试验研究．机械工程学报，1993（4）
13 刘庄，曹起骧等．大锻件工艺过程模拟研究的回顾与展望．大型铸锻件，1999，No1
14 Guo Hui guang etcl．AnInvestigation for Straining and Strengthening Die of the Retaing Rings of generator RotorICDM．1990
15 郭会光等．Mn18Cr18N钢护环控制成形于控制冷却的研究．钢铁，1995，No．10
16 杨煜生，陶永发等．护环液压胀形法的新发展及补液胀形的生产应用．大型铸锻件，1992（3）
17 Chen Huiqin，Guo Huiguang．Simulation and Prediction of Microstructure in Hot Forming of Metals Trams Nonferrous Met－Soc－china．V01．10，No．4，2000．8，465～468
18 吕炎主编．锻件组织性能控制．北京：机械工业出版社，1999